



ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

***ANÁLISIS DEL PROCESO DE PROYECCIÓN
TÉRMICA CON LLAMA OXIACETILÉNICA DE
SUPERALEACIONES CON GRAFENO PARA
LA OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTES***

TRABAJO FIN DE GRADO

AUTOR/A

Nicolás Gracia Alagarda

DIRECTOR/A

José Antonio Heredia Álvaro

Castellón, 8 de julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la confianza depositada en mí por parte de los profesionales implicados en todo el proyecto, desde el proceso de investigación hasta la redacción de este documento, pasando por el desarrollo experimental del mismo. Asimismo, me gustaría destacar la buena disposición de la empresa Castolin Eutectic. Y como no, agradecer a las personas que desde el ámbito personal me han apoyado en todo momento.

RESUMEN

La proyección térmica consiste en emplear calor y alta velocidad para acelerar partículas de material generalmente fundido y proyectarlas sobre una superficie de tal forma que al impactar se depositan creando un fino revestimiento que se une a las irregularidades de la superficie y se consigue una mejora en las propiedades del elemento.

Es un proceso con multitud de aplicaciones, altamente rentable y competitivo. Hasta ahora sus principales usos han consistido en proteger contra el desgaste y la corrosión y/o generar recubrimientos de barrera térmica con la finalidad de alargar la vida de las piezas, lo cual supone un coste considerablemente menor que la sustitución de la pieza en cuestión. Por ello, en esta industria existía hasta ahora una cierta despreocupación por las pérdidas económicas que suponen las mermas de material.

Esta visión queda obsoleta cuando se trata de materiales avanzados que dotan al sustrato de propiedades sustancialmente mejoradas, pero cuyo coste es mayor. En este ámbito cobran gran relevancia los nanomateriales, ya que su adición a compuestos tradicionales aporta al sustrato mejores propiedades.

Este trabajo pretende establecer un método que permita estimar el coste de un recubrimiento con nanocompuestos antes de proyectarlo. De tal forma que, estableciendo ciertos parámetros, como el grosor del revestimiento, se pueda determinar las pérdidas económicas en forma de mermas para determinar si es rentable recuperar el material no depositado sobre el sustrato.

La finalidad es desarrollar un método genérico y que, además, pueda servir como base para en un futuro optimizar las rutas de proyección en función de la forma y la superficie del sustrato y el grosor requerido. El método se valida parcialmente sobre un único sustrato y mediante un sistema de proyección específico.

Se considera este proyecto una prolongación de las prácticas realizadas en colaboración con el grupo de investigación de ingeniería de materiales de la

Universitat Jaume I, en las cuales se desarrollaron los ensayos para generar muestras que se han tomado como base para modelar la adhesión del material proyectado sobre el sustrato. Además, del procedimiento empírico, el trabajo ha sido acompañado de una investigación sobre el estado del arte, consistente en el análisis de publicaciones científicas, principalmente artículos, referentes al modelado de la deposición del material proyectado.

De acuerdo con la norma UNE 157001:2014, el trabajo final de grado constará de memoria, anexos y presupuesto.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los métodos de proyección en función de la temperatura del flujo transportador y la velocidad de las partículas	32
Figura 2: Esquema FS “wire”	35
Figura 3: FS “powder”	35
Figura 4: parámetros de proyección para cada método	37
Figura 5: Aplicaciones	37
Figura 6: Imagen SEM láminas de grafeno	43
Figura 7: Alótropos del carbono	44
Figura 8: Esquema proyección por plasma	57
Figura 9: Esquema ángulo de impacto sobre el sustrato	58
Figura 10: Comparativa de la velocidad de salida de las partículas para una misma boquilla en función de la presión	60
Figura 11: Misma comparativa que en la Figura 10 para una boquilla distinta	61
Figura 12: Indicaciones del fabricante acerca de los gases	62
Figura 13: Ejemplo análisis precisión recubrimiento	64
Figura 14: Esquema de la trayectoria descrita por el robot	65
Figura 15: Comparativa flujo de deposición teórico y empírico	66
Figura 16: Comparativa perfil experimental y simulado	67
Figura 17: Representación tridimensional de la distribución de masa en un caso de proyección a 90°	68
Figura 18: Esquema correspondiente a una mitad simétrica de sección transversal vertical a través del depósito	69
Figura 19: Esquema del procedimiento experimental	70
Figura 20: Volumen generado tras la proyección	73
Figura 21: Imagen de alto contraste del perfil del volumen generado	74

Figura 22: Histograma realizado con los puntos extraídos del perfil fotografiado	74
Figura 23: Proyección fallida de aleación de base Cromo	75
Figura 24: Ejemplo de proyección puntual	77
Figura 25: Imagen procesada de un perfil de recubrimiento puntual (dimensiones no reales)	79
Figura 26: superposición de una misma curva sobre los 4 perfiles de una proyección	81
Figura 27: Azulejos empleados como sustrato	85
Figura 28: Información técnica del fabricante	86
Figura 29: Esquema partes soplete.....	87
Figura 30: Especificaciones técnicas CastoDyn DS 8000	87
Figura 31: Montaje del soplete sobre un soporte en el laboratorio	88
Figura 32: Detalle boquilla A0S	89
Figura 33: Especificaciones presión gases	90
Figura 34: Instalación suministro y regulación de la presión de los gases	90
Figura 35: Disposición del soplete sobre un soporte frente a la cabina con flujo de agua constante	91
Figura 36: Características específicas 28030 METACREAM	92
Figura 37: Propiedades del polvo EUTALLOY 10009	94
Figura 38: Especificaciones grafeno	94
Figura 39: Mettler Toledo PB303 durante la preparación de una muestra	95
Figura 40: Mezclador de rodillos	96
Figura 41: Calibre digital	96
Figura 42: Elementos de protección	97
Figura 43: Nikon D3000	98
Figura 44: Ejemplo función lectura imágenes MATLAB	100

Figura 45: Distribución normal	103
Figura 46: Esquema secciones muestra	104
Figura 47: Ecuación distribución normal bidimensional	105
Figura 48: Imagen obtenida mediante este método	106
Figura 49: Perfil sobre papel milimetrado	107
Figura 50: Frecuencia relativa asociada a los puntos de una muestra	107
Figura 51: Comparativa entre el perfil experimental (verde) y el teórico (azul)	108
Figura 52: Fotografía y gráfica extraída mediante reconocimiento de imagen de un mismo perfil	109
Figura 53: Muestra de la proyección puntual de 18 gramos de aleación Ni-Al	115
Figura 54: Detalle de las irregularidades en la muestra generada con Ni-Al y un 0,3% de grafeno	116
Figura 55: Muestra proyección Ni-Al + 1% grafeno	116
Figura 56: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 1 (medidas en milímetros)	117
Figura 57: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 2 (medidas en milímetros)	117
Figura 58: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 3 (medidas en milímetros)	118
Figura 59: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 7 (medidas en milímetros)	118
Figura 60: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 8 (medidas en milímetros)	119
Figura 61: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 9 (medidas en milímetros)	119
Figura 62: Simulación revestimiento completo azulejo (para una desviación típica y unas condiciones de optimización determinadas)	120

Figura 63: Fotografía proyección Pr 1	122
Figura 64: Extracto de los resultados teóricos para la proyección Pr 1	123
Figura 65: Simulación proyección Pr 1 optimizada	124
Figura 66: Extracto de los resultados teóricos para la proyección Pr 2	125
Figura 67: Imagen de la proyección Pr 2 experimental	126
Figura 68: Extracto de los resultados teóricos para la proyección Pr 3	126
Figura 69: Distribución normal para distintos valores de media y desviación típica	157
Figura 70: Representación de una normal bivalente con medias nulas y desviaciones típicas iguales en ambos ejes	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Errores relativos entre las masas reales y las teóricas	115
Tabla 2: Resultados de ensayos de trayectoria	121
Tabla 3: Material empleado en cada proyección	140
Tabla 4: Resultados deposición proyecciones	141
Tabla 5: De izquierda a derecha, por colores: (naranja) coordenadas puntos sobre papel milimetrado; (azul claro) coordenadas en dimensiones reales; (azul oscuro) frecuencias relativa y absoluta; (verde) coordenadas teóricas en unidades reales	153
Tabla 6: Datos experimentales de ensayos de trayectoria	154

INDICE GENERAL

1. MEMORIA	16
2. ANEXOS	136
3. PRESUPUESTO	179

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETO	23
2. ALCANCE	28
3. ANTECEDENTES	31
3.1 PROYECCIÓN TÉRMICA	
3.1.1 PULVERIZADO POR LLAMA	
3.1.2 APLICACIONES	
3.1.2.1 DESGASTE Y CORROSIÓN	
3.1.2.2 RECUBRIMIENTOS DE BARRERA TÉRMICA	
3.1.3 PULVERIZADO TÉRMICO NANOESTRUCTURADO	
3.1.3.1 PARTÍCULAS NANOESTRUCTURADAS	
3.2 GRAFENO	
3.3 ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS	
3.3.1 TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE LAS NANOPARTÍCULAS	
3.3.2 HERRAMIENTAS PARA LA OPTIMIZACIÓN	
4. NORMAS Y REFERENCIAS	50
5. PLAN DE TRABAJO	53

5.1 DOCUMENTACIÓN

5.1.1 CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

5.1.2 SECTOR INDUSTRIA

5.2 ESTUDIO TEÓRICO DEL MODELO DE PROYECCIÓN

5.3 DESARROLLO EMPÍRICO

5.3.1 ENSAYOS

5.3.1.1 PREVIOS

5.3.1.2 PUNTUALES

5.3.1.3 DE TRAYECTORIA

6. MATERIAL Y MÉTODOS 85

6.1 MATERIAL

6.1.1 AZULEJOS

6.1.2 SOPLETE

6.1.2.1 BOQUILLAS

6.1.3 GASES

6.1.4 CABINA

6.1.5 POLVOS

6.1.5.1 28030 METACREAM

6.1.5.2 ROTOTEC 51000

6.1.5.3 EUTALLOY 10009

6.1.6 GRAFENO

6.1.7 BÁSCULA DE PRECISIÓN

6.1.8 RECIPIENTES**6.1.9 MEZCLADOR DE RODILLOS****6.1.10 CALIBRE****6.1.11 VARILLA****6.1.12 CUCHARILLA****6.1.13 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN****6.1.14 CÁMARA RÉFLEX****6.2 SOFTWARE****6.2.1 PHOTOSHOP****6.2.2 EXCEL****6.2.3 MATLAB****6.2.3.1 IMAGE PROCESSING TOOLBOX****7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES 103****7.1 DISTRIBUCIÓN DE MASA****7.2 OPTIMIZACIÓN****8. RESULTADOS FINALES 114****8.1 ANÁLISIS GRÁFICO PROYECCIÓN****8.2 COMPARATIVA EXPERIMENTALES –
TEÓRICOS****8.3 OPTIMIZACIÓN****8.3.1 DATOS EXPERIMENTALES**

8.3.2 RESULTADOS TEÓRICOS

9. CONCLUSIONES	129
10. BIBLIOGRAFÍA	132

1. OBJETO

En el presente estudio se pretende analizar la forma en que se deposita un material sobre un sustrato durante el proceso de proyección térmica, en concreto mediante un soplete de llama de oxifuel, y particularmente para el caso de materiales nanoestructurados usando el grafeno como aditivo. La finalidad es conocer la forma en que se deposita para realizar un modelo de previsión de costes que pueda ser un primer paso para el desarrollo de un sistema de optimización de la cantidad de material, y, en consecuencia, del coste, del proceso.

Es importante remarcar que este modelo debe ser una herramienta genérica y no ceñida a un único tipo de proyección, sustrato o material proyectado. En este caso, se empleará la tecnología disponible en la Universitat Jaume I (soplete de llama de oxifuel) mediante la cual se proyectan ciertos materiales a los que se incorporará un material avanzado en forma de aditivo.

Para ello, se pretende demostrar que la forma en que se adhiere un material al sustrato depende de variables que siguen ciertos patrones y que son dependientes de variables que se asocian al material, el método de proyección empleado... que pueden ser predichas de tal forma que, preestableciendo algunos parámetros, como el grosor del revestimiento o el área que se pretende recubrir y la geometría de la misma, se pueda determinar la trayectoria que se debe seguir para minimizar las mermas de material, y por tanto, el coste del proceso.

Como se ha indicado, entre otras cosas, este estudio sentará las bases que permitan realizar una previsión de las pérdidas económicas asociadas a las mermas de material durante el proceso de proyección térmica, para así minimizarlas y optimizar la cantidad de material requerida para el tratamiento con la finalidad de facilitar la viabilidad económica del proceso frente a otras

alternativas, como puede ser la sustitución de la pieza en cuestión por una nueva o el tratamiento mediante otro sistema de pulverizado de material.

Así mismo, se detallarán los costes referentes a los materiales empleados, licencias de software, o los costes de mano de obra, entre otros.

Para ello, se recopilarán los datos pertinentes mediante la solicitud a múltiples fuentes, por ejemplo, institutos de investigación, como el Centre de Projecció Térmica, asociaciones como European Thermal Spraying Association, o compañías referentes en el sector, como Castolin Eutectic, que ha sido el principal proveedor del material necesario para el desarrollo de la parte experimental del estudio.

Además, al tener conocimiento de la forma en que se deposita el material pulverizado, es decir, de la distribución de la masa en el sustrato, este estudio no solo proporciona una herramienta a nivel de optimización de la cantidad de material requerida, sino que facilita el control sobre, por ejemplo, el grosor del revestimiento que se debe de aplicar, por lo que permitirá desarrollar revestimientos con tolerancias más ajustadas.

La complejidad del análisis recae en que el estudio no se centra en el tratamiento de un producto con unas dimensiones concretas, sino que se pretende la obtención de unas directrices muy genéricas que permitan calcular de forma sencilla, aunque aproximada, las pérdidas de material asociadas cualquier proceso de proyección (cualquier geometría, cualquier material como sustrato...) y sus correspondientes costes, con la finalidad de disminuir estos últimos.

Por ello, los costos se verán asociados a unidades de masa aplicadas por unidad de tiempo o unidades de superficie por unidad de tiempo, para un tipo de recubrimiento y una técnica empleada específicos.

Además, dado que los factores como las propiedades intrínsecas de cada superficie, el acabado superficial requerido, la necesidad o no de lubricación o la temperatura del sustrato, de cada aplicación provocan que deba considerarse en

detalle antes de seleccionar un material de recubrimiento y proceso de pulverización térmica, lo cual propicia que sea complejo realizar un análisis de optimización de costes sin tener en cuenta unas condiciones específicas y realizarlo de forma genérica.

El estudio se focaliza sobre el empleo de materiales nanoestructurados como elemento proyectado debido a que es un método relativamente novedoso y la bibliografía al respecto es escasa.

De este modo, se estudia cómo afecta esta condición en lo que al vuelo e impacto de las partículas sobre el sustrato se refiere. También es importante resaltar que el precio de estos materiales, como se ha dicho, al requerir de un proceso especializado para obtenerlos, es considerablemente mayor que el de los polvos convencionales, por lo que la disminución de las mermas se refleja en un mayor ahorro económico, con lo cual, la realización de este estudio se ve claramente justificada.

Cabe destacar que una parte importante del presente estudio recae sobre la recopilación de libros de texto, publicaciones, artículos u otras fuentes bibliográficas que analicen estos aspectos y también lo hagan desde un punto de vista físico que permita comprender y extrapolar para un supuesto genérico la geometría y la distribución de masa que adquieren las partículas, en este caso nano, mientras son impulsadas por los gases hasta el sustrato, es decir, durante el vuelo, y sobre todo, en el momento del impacto con este.

De esta forma, se pretende optimizar la trayectoria de desplazamiento del soplete para minimizar la cantidad de material que no impacta en el sustrato, pero que a la vez permita obtener un grosor mínimo en todos los puntos de la superficie y que este sea lo más uniforme posible.

Además, en la medida de lo posible, se analizará la influencia de la tasa de deposición, es decir, qué porcentaje del material que sí impacta en el sustrato

queda realmente adherido a este, ya que también puede ser un factor influyente en las pérdidas.

2. ALCANCE

El mercado de recubrimientos mediante pulverizado térmico está consolidado en la industria a nivel mundial gracias a la presencia de algunas importantes entidades internacionales y muchas compañías a nivel regional. Proporciona un amplio espectro de posibilidades en cuanto a sus aplicaciones, entre las que podemos destacar tratamientos contra la corrosión, erosión o abrasión (mediante recubrimientos de óxidos, compuestos de carburo, aleaciones de metales duros, etc.), revestimientos conductores y aislantes, recubrimientos de aislamiento térmico, etcétera.

Esta clase de tratamientos se pueden llevar a cabo prácticamente sobre cualquier material y en cuanto al tipo de producto que es rociado, en general, puede ser empleado cualquiera que tenga una fase fundida estable.

Además, para la producción de los recubrimientos más avanzados son necesarias cabinas, pero también existen equipos que facilitan una total movilidad y permiten realizar el proceso in situ, sin necesidad de desplazar la pieza a tratar hasta el emplazamiento del taller.

Estas características hacen que el proceso sea realmente versátil, por lo que gran variedad de industrias como la aeroespacial, biomédica, de procesamiento químico, minera, servicios eléctricos, automotriz, de papel... emplean los recubrimientos de pulverización térmica para mejorar el rendimiento del producto, extender la vida útil de los componentes y/o reducir los costos de mantenimiento.

Por último, cabe destacar dos aspectos que fundamentan el trabajo desarrollado:

- La industria del revestimiento se ha visto obligada a buscar nuevas tecnologías y materiales para mejorar la eficiencia de los revestimientos por los beneficios económicos y las crecientes preocupaciones ambientales.

- Debido a las excelentes propiedades del grafeno, se cree que podría utilizarse para mejorar significativamente el rendimiento del recubrimiento.

3. ANTECEDENTES

Los inicios de este tipo de procesos se remontan a finales del siglo XIX, cuando se desarrollan los primeros sistemas para la pulverización de metales, aunque no es hasta 1912 cuando se patenta la primera técnica de proyección térmica propiamente dicha.

Respecto al interés por la forma en que se depositan los materiales, los primeros artículos científicos al respecto surgen a finales del siglo XX. Cabe destacar el interés de instituciones de gran renombre como la Nasa (*National Aeronautics and Space Administration*), que publicó un artículo al respecto en 1995.

Sin embargo, posiblemente al tratarse de un proceso tan rentable y altamente competitivo frente a otras alternativas, no es hasta hace pocos años, con el desarrollo comercial de recubrimientos con materiales avanzados (cuyo coste es más elevado), cuando empieza a observarse un interés por los aspectos económicos del proceso. En este sentido, cabe destacar un estudio publicado en 2012 de la *KTH Royal Institute of Technology* en el que se analizan los costes de un novedoso sistema de proyección térmica, HVOF (*High Velocity Air-Fuel*).

3.1 PROYECCIÓN TÉRMICA

Se denomina proyección térmica al conjunto de procesos industriales que emplean calor y alta velocidad para acelerar partículas de material fundido, semi-fundido o sólido y proyectarlas sobre una superficie de tal forma que al impactar se aplanan, generando los *splats*, y se depositan creando un fino revestimiento que se une a las irregularidades de la superficie y se consigue una mejora en las propiedades del elemento.

Desde su invención del primer procedimiento hasta la actualidad, se han ido desarrollando las diferentes variantes del proceso de pulverizado:

- por llama (FS, por sus siglas en inglés)
- por arco eléctrico (AS)
- por detonación (D-Gun)
- mediante arco de plasma, con sus diferentes variantes (VPS, APS, CAPS)
- mediante gas frío (CGSM)
- de alta velocidad con oxifuel (HVOF)
- de alta velocidad con aire-fuel (HVOF).

Cada uno de los cuales se caracteriza principalmente por la fuente de energía empleada para conseguir generar, mediante un flujo gaseoso, una corriente de partículas que haga que éstas impacten sobre la superficie a tratar. Como se puede apreciar en la figura 1, cada una de estas variantes del proceso se corresponde con unos valores típicos de temperatura y velocidad que se transmiten a las partículas:

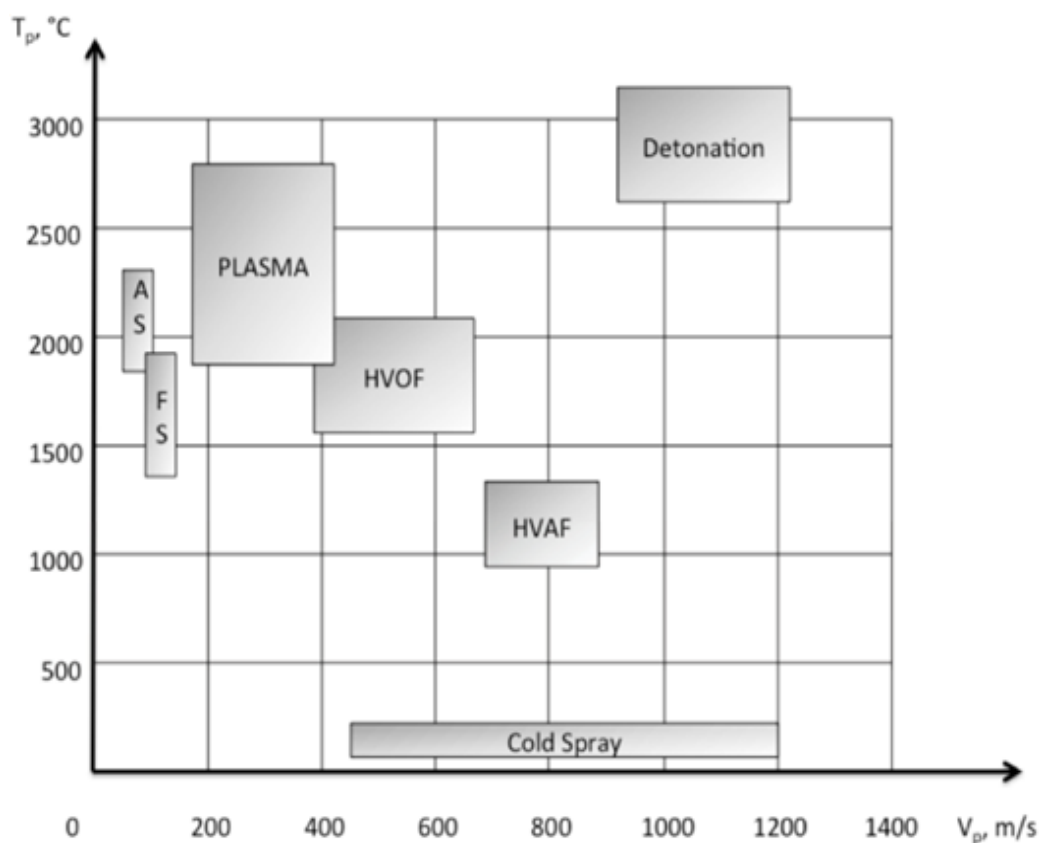


Figura 1: Clasificación de los métodos de proyección en función de la temperatura del flujo transportador y la velocidad de las partículas.

Sea cual sea el material sobre el que se va a proyectar, siempre es recomendable un proceso previo de preparación de la superficie, consistente en un proceso de limpieza, seguido habitualmente de un conformado, previo a la aplicación de *máscaras* con la morfología adecuada para proteger las partes que no deben ser tratadas del proceso de “activación de la superficie”. Por otro lado, la aplicación de un tratamiento posterior, el cual se suele basar en procesos de calentamiento o en principios electromagnéticos, se considera clave en la obtención de un revestimiento de calidad.

Cabe destacar la importancia de algunos aspectos físicos o químicos del proceso, debida a su relación directa con las variables del proceso que determinan el coste final del mismo, como pueden ser las incrustaciones de óxidos en el material, la porosidad de éste, los cambios que sufren las partículas durante el tiempo que se encuentran en suspensión o los ratios de enfriamiento de los *splats*.

Se denomina nanomaterial a aquel material que contiene nanopartículas de un tamaño que no supera los 100 nanómetros en al menos una de sus dimensiones, es decir, tienen un tamaño que se sitúa entre la microescala (1 μm) y la escala atómica/molecular (en torno a 0.2 nm). Estas características hacen que desarrollen propiedades que se encuentran entre las correspondientes a entes macroscópicos y las descritas por la física cuántica, lo cual tiene como consecuencia una mejora significativa de las propiedades ópticas, mecánicas, eléctricas, estructurales y magnéticas, entre otras.

El interés por desarrollar y estudiar revestimientos nanoestructurados proviene en particular de las propiedades mejoradas de éstos en comparación con aquellos donde la estructura es de tamaño micrométrico, ya que, reducir la escala de la estructura a la el nivel del nanómetro permite aumentar la resistencia, mejorar la tenacidad, aumentar el coeficiente de la temperatura expansión mientras se reduce la densidad aparente y el módulo elástico y se reduce la temperatura aparente conductividad, entre otras numerosas mejoras potenciales.

La recopilación de toda la información acerca de la proyección térmica tiene como última finalidad vislumbrar cuales son los parámetros que definen las diferentes variables del proceso, cómo afectan a la cantidad de material perdido, evaluar cuál es su coste y en qué medida merece la pena asimilar estos u optar por otra alternativa. De esta forma, se recopilarán datos de empresas e instituciones con una relación próxima con el sector para realizar con ellos los cálculos pertinentes. Además, se tendrá en cuenta que los datos pueden variar considerablemente según el tamaño de la compañía a la que se le solicite la información, ya que, por ejemplo, el coste por unidad de volumen de un determinado combustible será menor cuanto mayor sea la capacidad de producción de la empresa y por ende el volumen de combustible empleado. Por ello, aunque se pretenderá que sean datos genéricos, los costes finales que se obtengan de los cálculos realizados tendrán un carácter estimativo.

3.1.1 PULVERIZADO POR LLAMA

Cronológicamente es considerado el primer método que se desarrolló, a principios del siglo XX, e inicialmente se empleaba para metales con bajo punto de fusión y progresivamente se extendió su uso para metales más refractarios e incluso cerámicos.

En este proceso se aprovecha la energía química de combustión en presencia de oxígeno de un combustible gaseoso para generar una llama caliente, en la cual se funde el material empleado, que puede encontrarse, convencionalmente, tanto en forma de polvo o alambres (*wire*, cuando se trata de metales o aleaciones y *rod* cuando se trata de materiales cerámicos), aunque en este caso se estudia el uso de nanomateriales. A continuación, se muestran imágenes que representan la situación interna de la boquilla para cada uno de estos tipos de proyección:

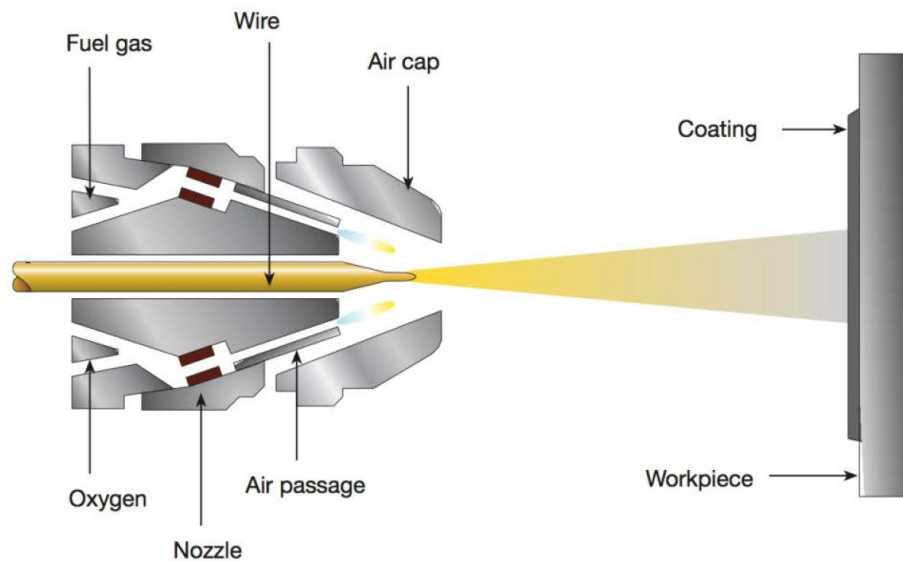


Figura 2: Esquema FS "wire"

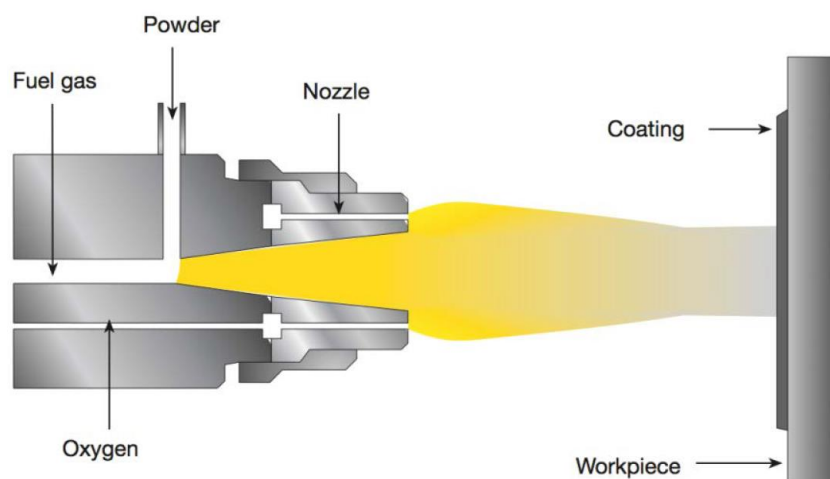


Figura 3: FS "powder"

A pesar de que con el uso de esos materiales convencionales se obtienen recubrimientos con una calidad inferior, es adecuado para muchas aplicaciones debido a su bajo coste de procesamiento, su movilidad y a que no requiere un equipo avanzado. Aun así, empleando materiales nanoestructurados y los correctos parámetros para su fusión las propiedades de los recubrimientos obtenidos mejoran.

En lo respectivo a la llama: la composición del gas empleado puede variar, es decir, el ratio entre la cantidad de oxígeno y la cantidad de combustible, y suele tomar valores comprendidos entre 1:1 (atmósfera de carburación) y 1,1:1 (atmósfera oxidante); el ratio de flujo de gas, así como la presión dependen del tipo de antorcha empleada; la temperatura y velocidad de la llama son unos de los parámetros más importantes y en este tipo de procesos toman valores comprendidos entre 1300 y 1900 °C y en torno a 160 m/s, respectivamente.

En cuanto al polvo, se pueden variar las propiedades químicas, físicas, la morfología de las partículas, la distribución del tamaño de las partículas y éste (convencionalmente entre 5 y 100 picómetros; menos de 100 nanómetros para el caso de los nanomateriales), y el flujo de alimentación (normalmente entre 50 y 100 gramos por minuto). En el caso de las varillas, su diámetro puede variar entre 3 y 6 milímetros y el ratio de alimentación varía entre 40 y 650 gramos por minuto, consiguiendo así una efectividad en la deposición (para un revestimiento de 100 picogramos) que va desde 1 hasta 23 metros cuadrados por hora.

La inyección del material se puede llevar en dirección axial o radial, empleando una alimentación gravitacional o un disco giratorio y el flujo de gas toma valores entre 3 y 5 litros por minuto (estandarizados, *slpm*). La distancia a la que se pulveriza es de 120 a 250 milímetros, el entorno es aire y la temperatura de la superficie a tratar se debe mantener entre 373 y 473 K cuando se pulverizan materiales cerámicos sobre metales (para evitar tensiones residuales).

Todos estos valores son propios de cada variante del proceso. Seguidamente, en la figura 4, se muestra una comparativa de los valores que adquieren las distintas variables del proceso en función del sistema de proyección del material empleado:

Item	Unit	HVOF	HVAF	Cold spray	D-Gun	Electric arc	Combustion wire	ASP
Jet								
Jet temperature	(°C)	2 500 - 3 000	1 900	0 - 700	5 200	5 200	3 200	15 000
Jet velocities	(m/s)	1 500 - 2 200	500 - 1 200	700 - 1 400	>1 000	50 - 100	50 - 300	300 - 1 000
Gas flow	(m³/h)	2.4 - 66	300	60 - 120	N/A	30 - 180	6 - 12	6 - 12
Gas types		CH ₄ , C ₂ H ₆ , H ₂ , O ₂	Air, N ₂ , CH ₄ , C ₃ H ₆	Ar, He, H ₂	C ₃ H ₆ , O ₂	Air, N ₂ , Ar	Air, O ₂ , C ₂ H ₂	Ar, He, H ₂ , N ₂
Power input	(kW equiv.)	20	N/A	2 - 25	N/A	2 - 5	20	20 - 200
Particle feed								
Particle temperature	(°C)	1 600 - 2 200	900 - 1 300	<400	2 600 - 3 500	>3 800	1 400 - 1 800	>3 800
Particle velocities	(m/s)	200 - 1 000	700 - 850	300 - 1 200	900 - 1 200	50 - 100	50 - 100	200 - 800
Material feed rate	(kg/h)	1 - 3	5 - 32	2 - 8	2 - 8	9 - 120	1.8 - 3	3 - 9
Deposit/coating								
Density range	(%)	>95	>95	>95	>95	80 - 95	85 - 90	90 - 95
Bond strength	(Mpa)	68	>68	>68	82	10 - 40	7 - 18	<68
Oxides		Moderate to dispersed	Small	Small	Small	Moderate to high	High	Moderate to coarse

Figura 4: parámetros de proyección para cada método.

3.1.2 APLICACIONES

Como se ha comentado antes se puede emplear este proceso con múltiples finalidades. Así lo muestra la siguiente figura, extraída de la web de una compañía del sector a nivel internacional, A&A COATINGS:

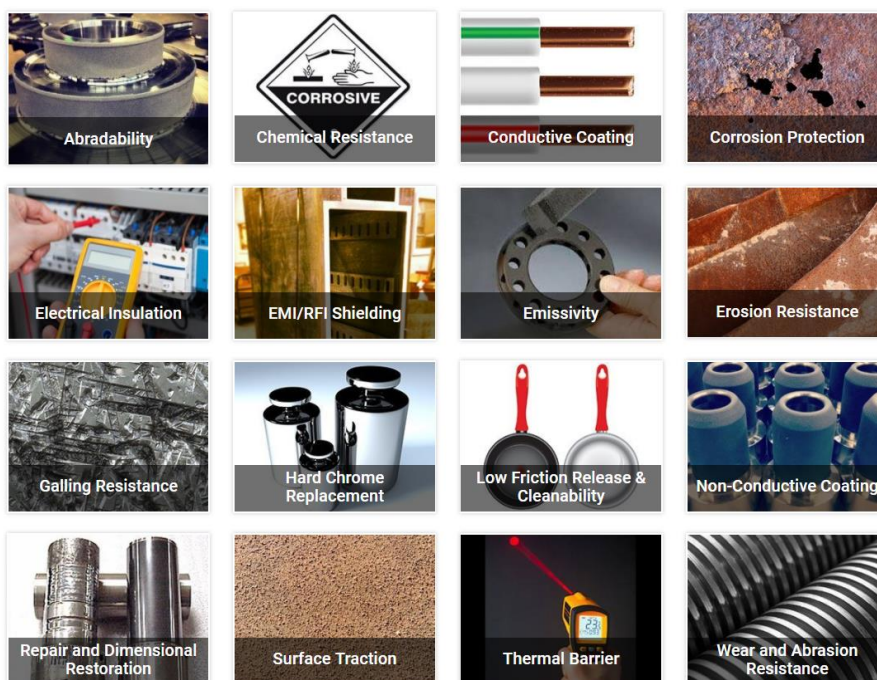


Figura 5: Aplicaciones.

De entre todas ellas destacan:

3.1.2.1 DESGASTE Y CORROSIÓN

Los recubrimientos de pulverización térmica son ampliamente utilizados en diversidad de aplicaciones, pero uno de sus mayores usos se da en aplicaciones que requieren protección contra el desgaste y la corrosión.

Las industrias (más adelante se profundiza en algunos ejemplos) tales como aeroespacial, biomédica, procesamiento químico, minería, servicios eléctricos, automotriz, papel... emplean los recubrimientos de pulverización térmica para mejorar el rendimiento del producto, extender la vida útil de los componentes y / o reducir los costos de mantenimiento.

Como se ha dicho, el desgaste y la corrosión representan una gran parte de las aplicaciones. Los materiales de recubrimiento como óxidos, compuestos de carburo y aleaciones de metales duros se usan ampliamente para resistir el desgaste abrasivo, erosivo y adhesivo.

Dado que varios factores, incluidas las propiedades intrínsecas de la superficie (dureza, ductilidad, resistencia, etc.), acabado superficial, lubricación, temperatura y corrosión contribuyen a la resistencia al desgaste de un componente, cada aplicación debe considerarse en detalle antes de seleccionar un material de recubrimiento y proceso de pulverización térmica. Esta característica es una de las que propicia que sea complejo realizar un análisis de optimización de costes sin tener en cuenta unas condiciones específicas y realizarlo de forma genérica.

Cromia, alúmina-titania, carburo de tungsteno-cobalto, cromo-níquel, estelita y molibdeno son algunos de los materiales de recubrimiento pulverizados térmicamente que se usan ampliamente para resistir el desgaste.

Las características no homogéneas de los recubrimientos de proyección térmica han limitado la mayoría de sus aplicaciones de corrosión a aquellas en las que

el recubrimiento proporciona una protección de sacrificio. El zinc y el aluminio, así como sus aleaciones, se utilizan para proporcionar protección de esta manera para infraestructuras, barcos y otras superficies grandes.

En los casos en que se aplica un material de recubrimiento más noble, es importante abordar el problema de la porosidad, que inhibe el funcionamiento del recubrimiento como una barrera física. En tales casos, se pueden considerar selladores orgánicos/inorgánicos, tratamientos térmicos o capas adicionales para proporcionar la barrera al sustrato. Es imperativo que todas las microgrietas y poros pasantes que proporcionan acceso penetrable para el agente corrosivo sean sellados; cualquier anomalía de revestimiento no sellada conduciría a una mayor velocidad de corrosión localizada.

3.1.2.2 RECUBRIMIENTOS DE BARRERA TÉRMICA

Se trata de otra aplicación ampliamente extendida son los recubrimientos de barrera térmica (TBC, por sus siglas en inglés), que son sistemas de materiales avanzados que generalmente se aplican a superficies metálicas, como pueden ser turbinas de gas o partes de motores, que trabajan a temperaturas elevadas, como una forma de gestión de disipación de calor.

Habitualmente estos revestimientos cuentan con un grosor de 0,1 a 2 milímetros y se emplean, usando partícula de materiales térmicamente aislantes para proteger algunos componentes sometidos a altas cargas de calor. Estos recubrimientos pueden permitir temperaturas de funcionamiento más altas al tiempo que limitan la exposición térmica de los componentes estructurales, extendiendo la vida útil de las piezas al reducir la oxidación y la fatiga térmica.

3.1.3 PULVERIZADO TÉRMICO NANOESTRUCTURADO

Esta familia de técnicas ha producido modificaciones de las técnicas existentes que mantienen el tamaño de los granos (y, finalmente, el grosor de los

recubrimientos) pequeños. Estas técnicas usan polvos muy finos (aglomerados o no) o precursores como suspensiones líquidas o soluciones que transforman la pulverización en el material de recubrimiento deseado. Las modificaciones a las técnicas existentes se relacionan principalmente con el diseño de alimentadores de material de pulverización y de inyectores, lo que permite inyectar partículas finas o líquidos en un chorro o llama.

Los nanomateriales se caracterizan por aportar propiedades notables y, en muchos casos, novedosas en relación a las propiedades ópticas, mecánicas, eléctricas, estructurales o magnéticas, entre otras. Ya no son solo una curiosidad de laboratorio, sino que son productos bien establecidos, con grandes volúmenes de fondos dedicados a su procesamiento y a las tecnologías de fabricación relacionadas, tanto en la investigación y el desarrollo, como en los niveles industriales. Actualmente, se utilizan en multitud de aplicaciones prácticas, como sensores de gases químicos, sistemas de conversión de energía, campos electrónicos y relacionados, textiles, catalizadores, celdas de combustible o biomateriales.

3.1.3.1 PARTÍCULAS NANOESTRUCTURADAS

Como se ha introducido anteriormente, se considera que un cuerpo pertenece a la escala nano cuando al menos una de sus dimensiones no supera los 100 nanómetros, tal como introdujo el físico norteamericano C. Koch [2]. Típicamente, las dimensiones de las partículas del polvo rociado varían entre 5 y 100 picómetros, aunque, para algunas aplicaciones en concreto, pueden tener una dimensión de hasta 150 picómetros.

La mayoría de los profesionales involucrados en este campo emplean la expresión "recubrimientos de pulverización térmica nanoestructurados" para designar los recubrimientos de pulverización térmica diseñados a partir de polvos aglomerados secados por pulverización nanoestructurados. Los revestimientos diseñados a partir de polvos convencionales que no exhiben ningún carácter nanoestructural significativo se denominan "revestimientos convencionales".

En los procesos convencionales de pulverizado térmico, se emplean alimentadores de polvo que se basan en un flujo de gas para empujar a las partículas hasta el chorro que ataca la superficie. Sin embargo, en el caso de las partículas nanoestructuradas, los polvos compuestos por tales estructuras finas son difíciles de manipular en estado seco, ya que tienden a no fluir libremente y normalmente provocan la obstrucción de las mangueras y orificios de los alimentadores de polvo típicos empleados en la proyección térmica común. Además, las partículas nanoestructuradas individuales no exhibirán la inercia y el momento necesarios para penetrar en las líneas de corriente de los chorros de pulverización térmica. Incluso si pudieran ser alimentados por un gas portador, tendrían tendencia a enviarse a la periferia del chorro de pulverización térmica, sin causar una deposición de revestimiento efectiva. Esta serie de características suponen un desafío, ya que los mecanismos empleados en los procesos “tradicionales” dejan de ser válidos, al menos parcialmente.

Por ello, para superar este obstáculo, el proceso de secado por pulverización se utiliza para aglomerar las partículas nanoestructuradas individuales en microscópicas. En el proceso de secado por pulverización, una suspensión que consiste en finas partículas dispersas, un aglutinante orgánico y agua se atomiza dentro de una cámara cerrada formando gotitas microscópicas de lodo, como describe Pawlowski y Berndt. Estas gotas se secan en la cámara durante su vuelo por una corriente de gas caliente (normalmente aire). Por gravedad, los aglomerados microscópicos secos caen en el colector de polvo de la cámara del secador por pulverización. Los aglomerados secados por pulverización son porosos y típicamente no presentan los niveles de cohesión “necesarios” necesarios para resistir la corriente turbulenta del chorro de pulverización térmica. En consecuencia, las partículas secadas por pulverización son típicamente tratadas térmicamente después de la producción para proporcionar resistencia cohesiva.

Después de que las nanopartículas individuales se aglomeran mediante secado por pulverización en polvos microscópicos, se pueden pulverizar usando los alimentadores de polvo típicos empleados en el procesamiento por pulverización

térmica, es decir, dispositivos de ruedas rotativas basados en la gravedad y sistemas de lecho fluidizado.

Es importante señalar que, para estas partículas, es primordial encontrar el umbral de compensación entre proporcionar resistencia cohesiva y mantener el carácter nanoestructural de la materia prima; es decir, temperaturas de tratamiento térmico demasiado altas y / o tiempos de tratamiento térmico prolongados pueden provocar la pérdida parcial o total del carácter nanoestructural del polvo debido al engrosamiento de las partículas y los efectos de sinterización, o a su fusión. Por ello, el efecto sobre el acabado final de la variación de parámetros de este tipo debe ser fuertemente tenida en cuenta al realizar el análisis de los costes.

3.2 GRAFENO

El grafeno se compone de hojas 2D formadas por átomos de carbono hibridados sp^2 unidos por enlaces covalentes fuertes en una red hexagonal, lo cual le proporciona propiedades eléctricas extraordinarias tales como alta movilidad de electrones a temperatura ambiente ($250.000 \text{ cm}^2/\text{V}$) y transporte balístico y efecto de sala cuántico a temperatura ambiente. Además, también tiene excelentes propiedades ópticas, así como excelentes propiedades mecánicas (módulo de Young de 1TPa y resistencia a la tracción cercana a 130GPa). En términos de propiedades térmicas, la conductividad térmica más alta a temperatura ambiente se reportó como 5000 W/m/K . El grafeno, al igual que su análogo 3D, el grafito, también tiene excelentes propiedades de lubricante sólido.

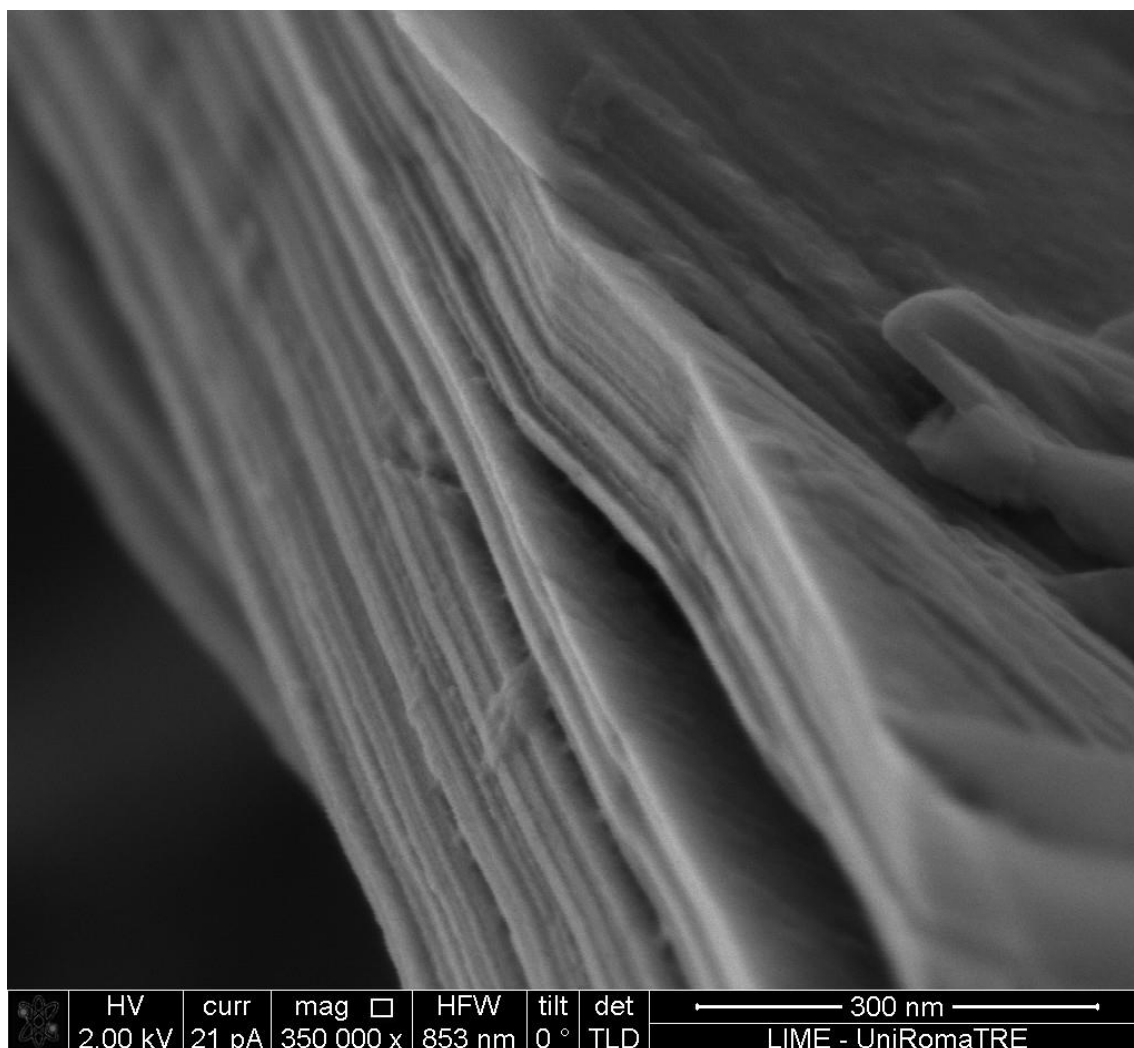


Figura 6: Imagen SEM láminas de grafeno.

En ocasiones existe cierta confusión en los que a estructuras de alótropos de carbono se refiere, por ello, es importante reseñar que en el presente estudio se hace referencia al grafeno estrictamente como el material conformado por estructuras hexagonales de carbono en un plano. En concreto, se ha empleado, para la parte experimental, grafeno de 3 a 6 láminas, con un grosor de entre 3 y 6 nanómetros. Estas características serán ampliadas en el apartado de materiales.

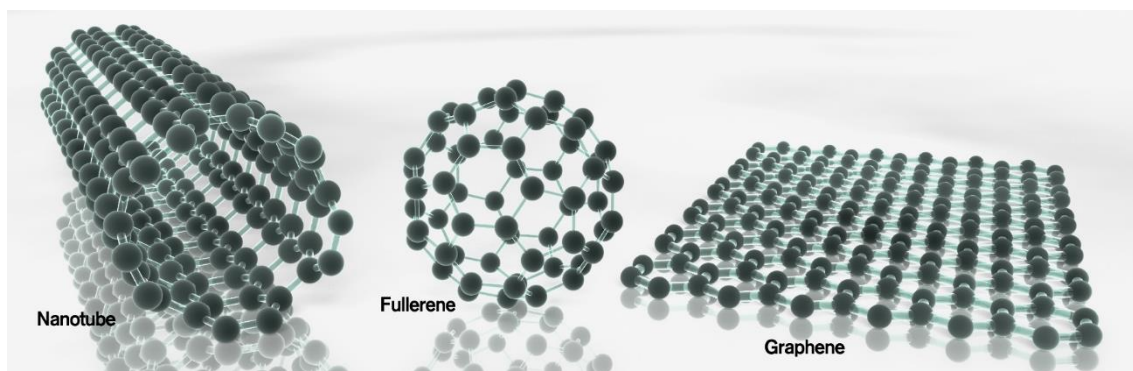


Figura 7: Alótropos del carbono.

3.3 ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

La optimización de los parámetros de los que depende la pulverización puede ser considerada la clave del estudio que nos concierne, para posteriormente tener en cuenta la influencia de estos en los costes y el acabado final.

Es importante resaltar que, si se emplean los métodos convencionales de fusión, el carácter nanoestructural de la materia prima se pierde durante la deposición del recubrimiento. Por lo tanto, los parámetros de pulverización deben optimizarse para producir condiciones de temperaturas y velocidades de partícula que den como resultado una fusión solo parcial de los aglomerados y de esta forma evitar la pérdida completa de la nanoestructura, pero que conduzcan a un grado suficientemente alto de fusión para asegurar la deposición efectiva sobre el sustrato y la formación de las llamadas nanozonas.

Uno de los objetivos críticos de la optimización de parámetros es controlar la densidad de las nanozonas, es decir, la densidad de los aglomerados nanoestructurados semifundidos incrustados en la microestructura del recubrimiento. Esto se logra al encontrar las condiciones para ajustar la cantidad de la parte fundida de cada partícula semifundida que penetra en los capilares

(es decir, el núcleo de la partícula no fundida) de los aglomerados durante el vuelo dentro del pulverizador térmico chorro y/o impacto en la superficie del sustrato y posterior resolidificación.

Es importante señalar que introduciendo nanozonas porosas o densas en toda la microestructura del recubrimiento es posible diseñar revestimientos con propiedades muy diferentes e incluso opuestas para una variedad de propósitos. Por ejemplo, para aplicaciones de barrera térmica y sellado abrasible, la presencia de nanozonas porosas es primordial. Por otro lado, para aplicaciones antidesgaste, las nanozonas densas son absolutamente necesarias para inducir altos niveles de resistencia al desgaste.

La principal técnica empleada para optimizar los parámetros de pulverización para diseñar revestimientos producidos a partir de partículas aglomeradas nanoestructuradas es la temperatura de partículas en vuelo y la supervisión de la velocidad. Una de las principales ventajas del control de partículas en vuelo es el hecho de que puede emplearse para optimizar los parámetros de pulverización para antorchas de plasma, antorchas y antorchas de oxígeno y combustible de alta velocidad (HVOF). Un elemento esencial del uso de la supervisión de partículas en vuelo para diseñar recubrimientos nanoestructurados es el conocimiento del punto de fusión del material a pulverizar.

A pesar de reseñar la importancia del control de ciertas magnitudes como se ha dicho, se considera este un proceso externo a este estudio. La determinación de ciertas variables corresponde al criterio de decisión del profesional encargado. Por tanto, lo que se pretende es que, una vez establecidos ciertos parámetros, mediante la realización de una muestra puntual, se obtengan ciertas medidas empíricas del recubrimiento que permitan, junto con los valores establecidos, minimizar el coste del proceso.

3.3.1 TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE LAS NANOPARTÍCULAS

Controlando y ajustando los parámetros principales de pulverización (por ejemplo, en el caso del plasma: potencia de la antorcha, flujos de gas, corriente y distancia de pulverización) es posible controlar la distribución de temperatura de las partículas.

De esta forma, la eficiencia de la deposición depende del punto de fusión alcanzado por las partículas: si la mayoría de las partículas están por debajo del punto de fusión, no se producirá una deposición de revestimiento efectiva; y en cambio, si la mayoría de las partículas tienen temperaturas superiores al punto de fusión del material, se podría lograr una alta eficiencia de deposición, pero, como ya se ha apuntado, parte del carácter nanoestructural de la materia prima puede tender a destruirse durante la deposición debido a la fusión o la parte fundida próxima a la superficie de los aglomerados tendería a penetrar profundamente en sus núcleos no fundidos, denominados capilares, formando así densas nanozonas.

Por lo tanto, lograr una distribución apropiada de partícula fundidas y no fundidas es un factor importante para preservar e integrar parte de la nanoestructura porosa original del polvo en toda la microestructura del recubrimiento. Sin embargo, la temperatura de la partícula y las distribuciones de velocidad no son el único factor importante en el procesamiento.

3.3.2 HERRAMIENTAS PARA LA OPTIMIZACIÓN

Como ya se ha indicado en varias ocasiones, desde un punto de vista científico, la velocidad de la partícula y la temperatura de la partícula junto con la temperatura del sustrato son los principales parámetros que afectan el depósito formación. Ellos determinan el proceso de acumulación de depósitos y las

propiedades de depósito. La velocidad y la temperatura de partículas afectan la eficiencia del depósito, así como la microestructura.

Se están desarrollando diferentes herramientas para comprender mejor el depósito formación y relación con las propiedades de recubrimiento. Estas herramientas están actualmente siendo recogido bajo un concepto de "Mapa de Proceso". Esto se puede considerar tener dos significados diferentes, con el objetivo de: optimización y mapeo de las diferentes condiciones de proceso en vuelo de las partículas, produciendo un diferente rango de fusión de las partículas; o, encontrar la influencia de diferentes *splat*, estructuras y sustratos en la estructura final y las propiedades del revestimiento.

Las herramientas individuales utilizadas principalmente en el mapeo de procesos son:

- i) Diagnósticos en vuelo, donde la velocidad y la temperatura de la partícula se miden durante su vuelo en la llama
- ii) *Splat studies*, donde la etapa de fusión de partículas y la dispersión/solidificación de gotitas es estudiado a partir del comportamiento de partículas individuales
- iii) Interacción entre la gotita y la superficie o con la capa previamente depositada, donde la temperatura del sustrato ha sido encontrado para tener influencia significativa en la morfología de la partícula, depósito microestructura y propiedades.

Los mapas de proceso también pueden significar equipos y estudios específicos de materiales para definir la interacción de un cierto rango de velocidad-temperatura con las propiedades finales del recubrimiento. En este caso, tanto las medidas de diagnóstico como las matemáticas modelado se utilizan para crear una ventana de proceso para asegurar el revestimiento deseado microestructura dentro de ciertos límites aprobados de fluctuaciones de parámetros.

Tras aportar la información anterior, la cual tiene cierto carácter técnico, cabe destacar que esta es importante para comprender ciertos aspectos del estudio que nos concierne, aunque este tiene el foco sobre la cantidad de materia que queda adherida y su distribución en el espacio, sin dar tanta importancia al cómo o el por qué desde el punto de vista físico-químico. Por ello, es cierto que se analizan artículos y demás fuentes bibliográficas que analizan la deposición desde el punto de vista, principalmente, de la ciencia de los materiales, pero simplemente con la finalidad de dilucidar cuál es la distribución de masa del material que se proyecta.

4. NORMAS Y REFERENCIAS

- UNE 157001:2014 → Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.
- UNE-EN ISO 14923:2004 →Proyección térmica. Caracterización y ensayo de los recubrimientos por proyección térmica (ISO 14923:2003).
- UNE-EN ISO 14921:2011 → Proyección térmica. Procedimientos para la aplicación de recubrimientos por proyección térmica para componentes mecánicos. (ISO 14921:2010).
- UNE-EN 13507:2011 → Proyección térmica. Tratamiento previo de las superficies de piezas metálicas y componentes para proyección térmica.
- UNE-EN ISO 12679:2016 → Proyección térmica. Recomendaciones para la proyección térmica. (ISO 12679:2011).
- UNE-EN ISO 14920:2015 → Proyección térmica. Proyección y fusión de los revestimientos obtenidos por proyección térmica de aleaciones autofundentes. (ISO 14920:2015).
- UNE-EN ISO 14919:2015 → Proyección térmica. Alambres, varillas y cordones para proyección por soplete y arco. Clasificación. Condiciones técnicas de suministro. (ISO 14919:2015).
- UNE-EN ISO 17836:2005 → Proyección térmica. Determinación del rendimiento de deposición en la proyección térmica. (ISO 17836:2004).

- UNE-EN ISO 14917:2017 → Proyección térmica. Terminología, clasificación. (ISO 14917:2017).

5. PLAN DE TRABAJO

Desde el momento en que se recibió la propuesta de la temática por parte del tutor, a mediados del mes de marzo del año 2018, se inició el trabajo realizado en colaboración con el grupo de investigación de materiales avanzados de la Universitat Jaume I para desarrollar este estudio que a grandes rasgos se puede dividir en cuatro etapas claramente diferenciadas:

5.1 DOCUMENTACIÓN

Con la intención de obtener unos datos sobre los cuáles basar el presente estudio con el mayor grado de verosimilitud posible, se analizaron tanto datos procedentes de documentación puramente teórica, como de resultados de estudios empíricos, como directamente de empresas del sector.

5.1.1 CONSULTA DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Primeramente, se inició un proceso de recopilación de información básica acerca de: el proceso de proyección térmica, en qué consiste, algunas nociones sobre la historia, el proceso físico-químico, los materiales (tanto los que pueden ser proyectados como sobre cuáles se puede proyectar), el tratamiento previo de la superficie en cuestión, los distintos métodos de proyección y comparativa entre ellos, el tratamiento posterior del elemento recubierto, el estudio del revestimiento, las aplicaciones del proceso, el posicionamiento de este mercado a nivel global y estatal y sus previsiones económicas de futuro, etcétera; y los materiales nanoestructurados, su definición, características, peculiaridades, características que aportan al recubrimiento frente a otras morfologías de mayores dimensiones, etcétera. En esta primera parte cabe destacar la consulta de los libros de texto [0] y [2], de Lech Pawlowski y Carl C. Koch, respectivamente.

Además, de forma paralela, y más específica, se inició la búsqueda de fuentes bibliográficas, y su posterior consulta, que tratasen acerca de estudios económicos relativos a procesos industriales y más concretamente a la proyección térmica, principalmente aquellos dedicados al análisis de los costes y sobretudo las pérdidas. Aunque la documentación disponible es relativamente escasa, cabe destacar (como ya se ha comentado anteriormente) en este apartado la fuente [1], publicada por el Real Instituto de Tecnología sueco (KTH).

5.1.2 SECTOR INDUSTRIA

Durante el periodo de tiempo correspondiente a esta parte del estudio, también se realizó una visita a las instalaciones que la empresa Castolin Eutectic tiene en Valdeavero, Madrid; la cual aportó una visión más comercial del proyecto y vislumbró datos técnicos y económicos reales acerca de la proyección térmica comercial.

Esta compañía es una multinacional presente en más de 100 países y es un referente en el desarrollo y venta de equipos de soldadura, y también en la venta de consumibles y equipos en el campo que nos concierne, la proyección térmica para recubrimientos.

La visita fue de gran utilidad para conocer las novedades y tendencias de este mercado, para presenciar el proceso de proyección térmica aplicado a casos reales y, sobretudo, para constatar y justificar el estudio, desde un punto de vista económico, de las mermas de material durante el proceso, ya que en cierto trabajo que estaban llevando a cabo ese día (recubrimiento de piquetas térmicas para una empresa de producción de cementos) se tenían unas mermas de material cercanas al 60%, lo cual según el personal de la empresa era algo habitual y aunque para ellos no supone pérdidas económicas porque el cliente sufraga todos los costes de material (más concretamente, compra tantos botes de material como sea necesario, y la empresa se encarga de realizar la proyección, que en este caso se llevaba a cabo mediante arco eléctrico), si podría suponer un mayor beneficio en caso de reducirlas.

Cabe destacar que dicha empresa es la principal proveedora del material empleado para el desarrollo de la parte experimental relativa a este estudio.

5.2 ESTUDIO TEÓRICO DEL MODELO DE PROYECCIÓN

Seguidamente, una vez adquiridos estos conocimientos y justificado el estudio como base a la obtención de soluciones al problema de las mermas, se procedió a una búsqueda y estudio más específico acerca de la geometría y distribución de masa de las partículas fundidas o semifundidas durante el vuelo hacía el sustrato y especialmente en el momento de impacto en este, así como del porcentaje de cantidad de material inicial que queda adherido en la superficie de la pieza tratada, con el fin de conseguir una aproximación teórica de las mermas durante el proceso y los costes asociados a esta, todo ello teniendo en cuenta las diferentes variables del proceso y en función de la boquilla, trayectoria, etc., definidas para el procedimiento. También se valoró e investigó la posibilidad de realizar una simulación mediante software CFD del proceso, pero esta línea de trabajo fue descartada.

Como se ha dicho, distintas fuentes bibliográficas fueron analizadas, principalmente artículos científicos basados en el estudio de procesos de proyección térmica similares y cuyos resultados se considera que pueden ser extrapolados para el caso que nos concierne: proyección con un soplete de llama acetilénica que proyecta material de forma perpendicular al sustrato. Así, por ejemplo, se adaptan los modos de trabajo y resultados que reflejan los principales documentos consultados:

- **A. Sadovoy, Modeling and offline simulation of thermal spray coating process for gas turbine applications, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Darmstadt**

Este artículo determina que la definición de la distribución del espesor del recubrimiento en una superficie de sustrato arbitraria requiere un modelo exacto del patrón de recubrimiento básico, como un punto de rociado. Cabe destacar que esta premisa será tomada como punto de partida para el desarrollo empírico que se expondrá en los siguientes apartados.

Además, se establece que los parámetros del punto de pulverización real dependen tanto de los parámetros de pulverización como de la geometría local del sustrato. Por lo que la descripción analítica o numérica de todas las interacciones relacionadas con los parámetros de la pistola pulverizadora y la geometría del sustrato supone una tarea muy compleja que requiere el conocimiento de una gran cantidad de parámetros del proceso de entrada, que en la mayoría de los casos son desconocidos o no se han estudiado lo suficiente como para que sean coherentes.

En base a las investigaciones experimentales y teóricas analizadas por Sadovoy, postula que las propiedades del depósito de revestimiento dependen en gran medida de la distribución y las condiciones físicas de las partículas de polvo en el plasma (en este caso) o chorro de llama. El material pulverizado forma por sí mismo un chorro con una distribución espacial específica de masa, velocidades y la temperatura de las partículas (en las próximas hojas se detallará la dependencia de estas dos últimas variables con respecto de la boquilla empleada y la presión del ente transportador de partículas).

Tal como se investigó para el desarrollo de este artículo experimentalmente y teóricamente, la distribución radial de estas propiedades en la sección transversal perpendicular del chorro de pulverización se puede describir con una alta precisión mediante funciones gaussianas. La dependencia axial de la temperatura media de las partículas y la velocidad en la distancia corriente abajo de la boquilla se describe típicamente mediante dependencias hiperbólicas. La forma divergente del chorro de pulverización se puede aproximar típicamente por

una forma cónica con el ángulo de divergencia que depende del proceso de pulverización específica. Debe mencionarse que los chorros de plasma y polvo pueden desplazarse entre sí, lo cual es el resultado de la inyección lateral de partículas de alimentación en el plasma.

Debido a que analiza la proyección mediante plasma y, como se ha dicho, la inyección de material en polvo se realiza con un cierto ángulo respecto del eje del jet de plasma, este último y el eje de jet de polvo no son coincidentes, tal como muestra la figura 8. En cambio, en el estudio que abordamos sí se consideran coincidentes, ya que, tal como se ha mostrado en la imagen 3, el flujo de material transportador (gas en este caso) y el material en polvo proyectado, parten desde la misma posición cuando salen de la pistola y con la misma dirección y sentido.

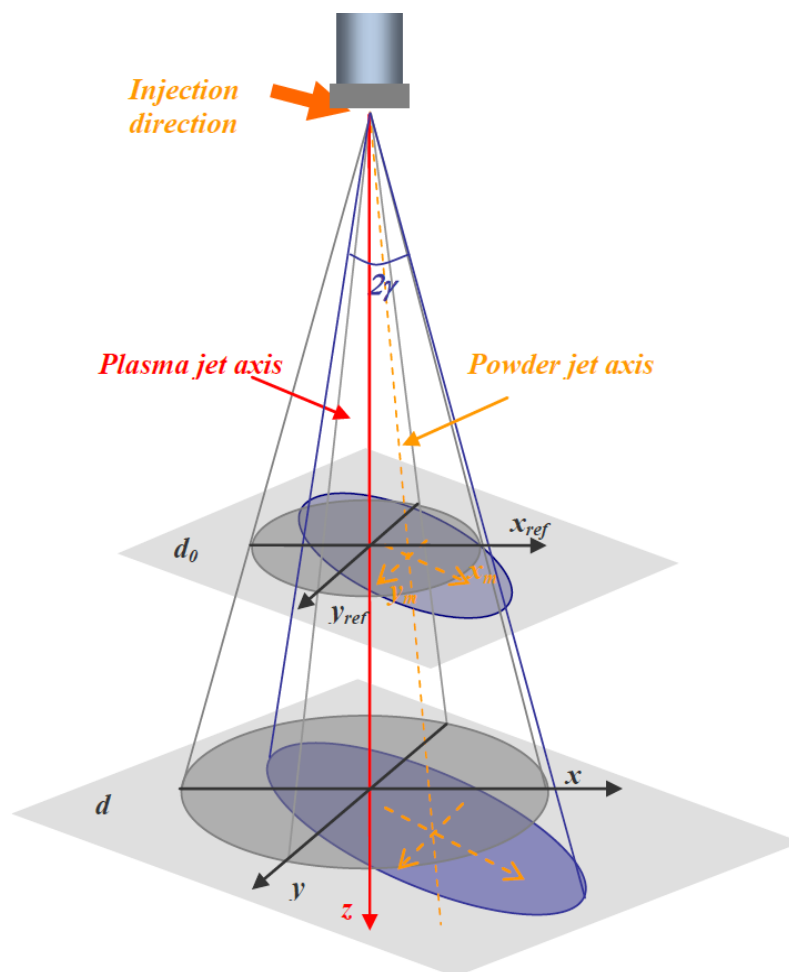


Figura 8: Esquema proyección por plasma.

En referencia a las funciones gaussianas comentadas, y tomando como referencia el sistema de coordenadas de la Figura 8, la distribución de las características del chorro de pulverización se puede escribir en la siguiente forma:

$$f(x_m, y_m, z_m) = f_0 \exp\left(-\frac{x_m^2}{2\sigma_x^2(z_m)} - \frac{y_m^2}{2\sigma_y^2(z_m)}\right)$$

Además, en este mismo documento, también se analiza la influencia del ángulo con que se proyecta, es decir, el ángulo que forman el eje del jet de material y el sustrato, mientras que para el caso que aquí se analiza ese ángulo se considera siempre de noventa grados, o lo que es lo mismo, que el ángulo denominado ϕ se define como nulo. Ya que esto permitirá simplificar los cálculos y orientarlo a un modelo más general.

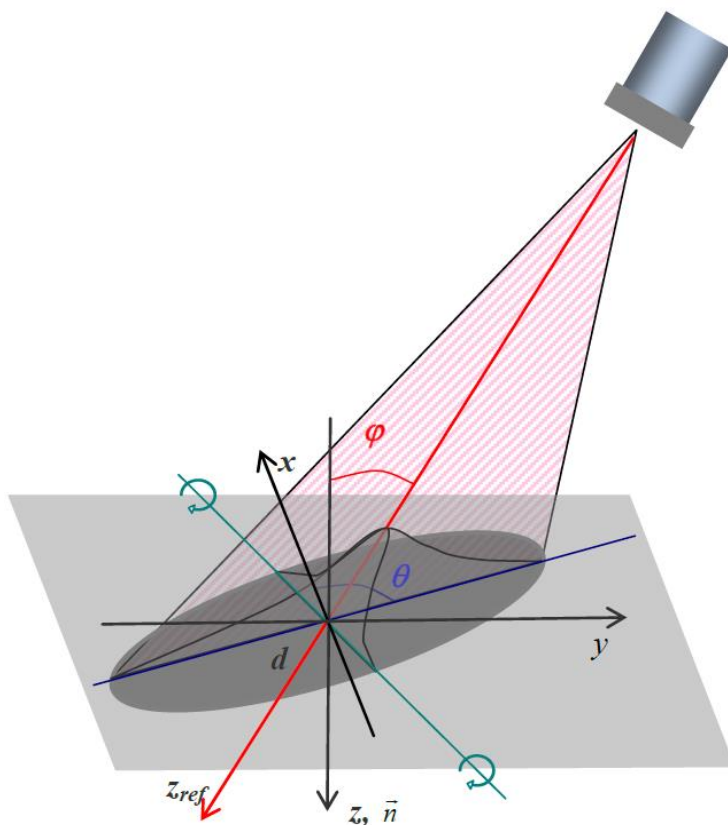


Figura 9: Esquema ángulo de impacto sobre el sustrato.

Tras asumir estas directrices el objeto de estudio queda más acotado y el siguiente paso tomado es la definición de la geometría que representa la distribución del flujo de masa del jet de material nanoestructurado.

- **Tao Zhang, Bo Dong, Xiaohong Chen, Zhonghua Qiu, Rui Jiang, Weizhong Li, Spray characteristics of pressure-swirl nozzles at different nozzle diameters, Applied Thermal Engineering 121 (2017) 984–991**

En este caso, se evalúa la influencia del tamaño de la boquilla y la presión del gas que sale por esta con la finalidad de analizar la influencia de estos parámetros en el resultado final del recubrimiento desde el punto de vista de la ciencia de los materiales y más concretamente en la distribución de velocidades de las partículas, la cual lógicamente tiene un efecto sobre la capacidad de estas para adherirse al sustrato.

Las características de rociado de una boquilla, un dispositivo ampliamente utilizado en la agricultura, la combustión y la industria aeroespacial, se han investigado en este estudio experimentalmente con un enfoque en los efectos del tamaño del orificio de la boquilla y la presión de inyección en la morfología, la distribución de la velocidad y el ángulo de rociado. Estos datos son extrapolables al ámbito de la proyección térmica que nos concierne.

En este caso, la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) ha sido utilizada para medir la distribución de la velocidad de los rociados de combustible generados por las boquillas con distintos diámetros de orificio a una longitud de orificio fija de 1,0 mm, bajo distintos valores de presión. A partir de los datos obtenidos por este estudio y el teorema de Buckingham, se ha desarrollado una correlación del ángulo de rociado y el número de Reynolds (Re), como $Re = 1.4Re^{0.39}$, donde se define en función del diámetro del orificio y la velocidad de salida estimada por caudal másico del combustible y área del orificio.

Sin embargo, analizar el flujo de proyección desde el punto de vista de la ingeniería de fluidos dificultaría la finalidad de obtener un sistema genérico para el cálculo de la distribución de masa sobre el sustrato.

En las siguientes imágenes se muestra la dependencia clara del ángulo de rociado (que tiene una influencia directa sobre la forma en que la masa se deposita, como se ha comentado) respecto de la presión del flujo y la geometría del orificio correspondiente a la pistola o soplete de proyección utilizado.

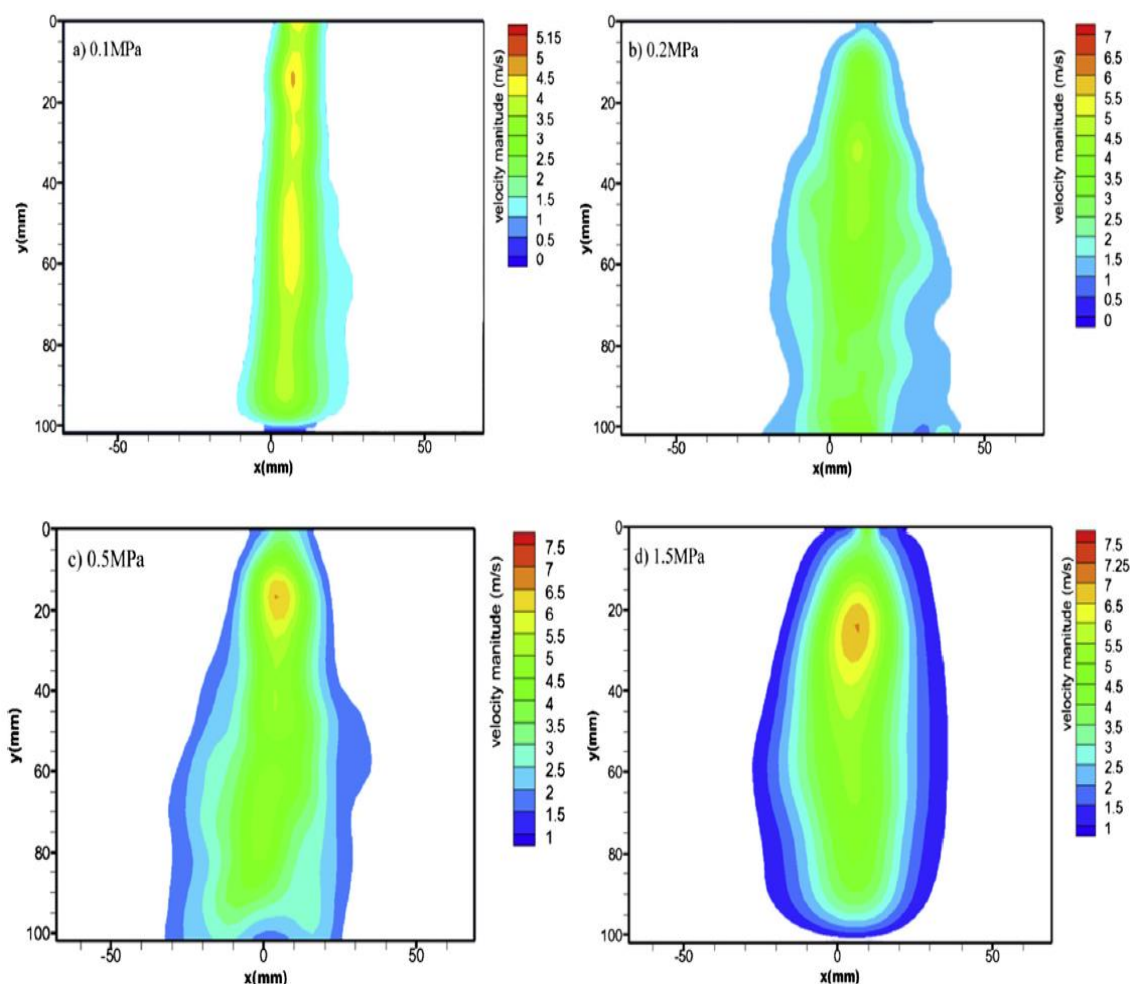


Figura 10: Comparativa de la velocidad de salida de las partículas para una misma boquilla en función de la presión.

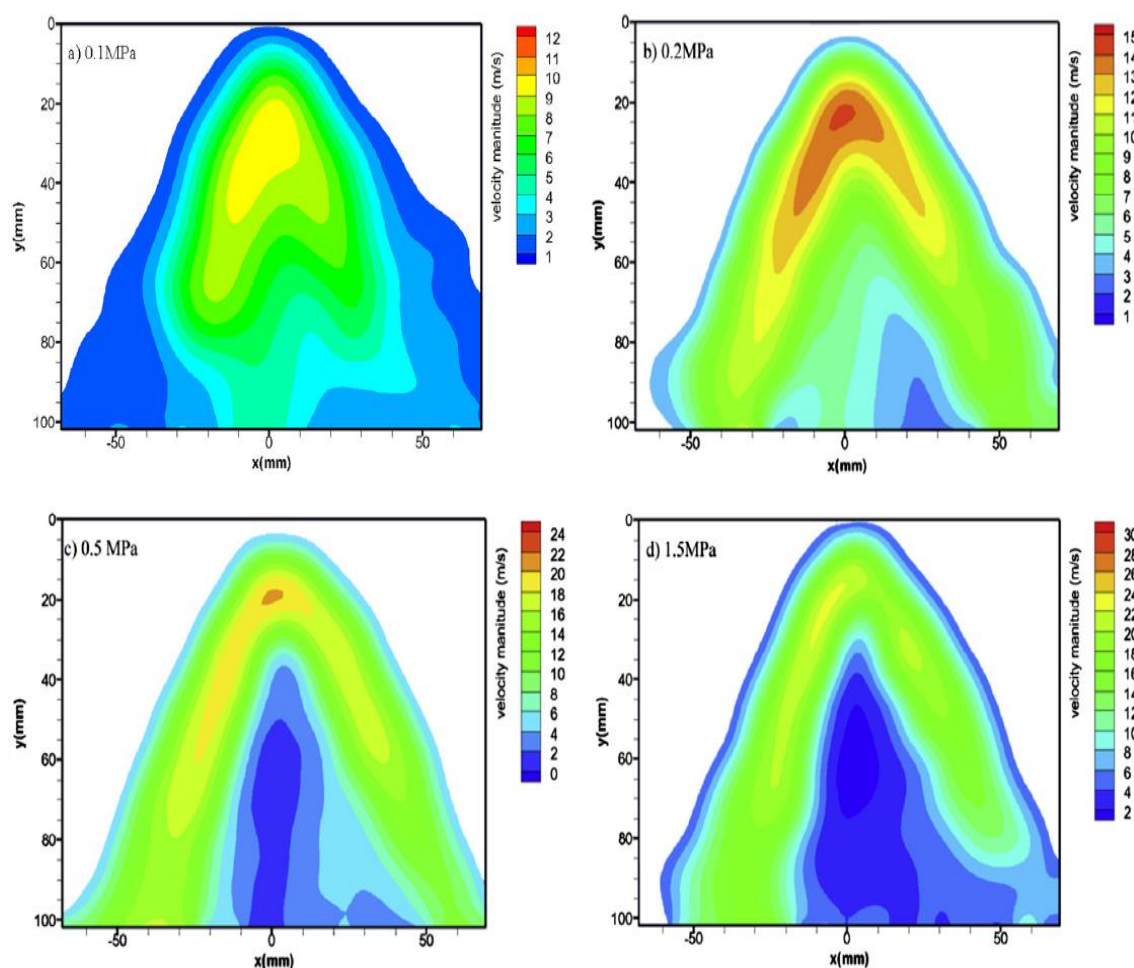


Figura 11: Misma comparativa que en la Figura 10. para una boquilla distinta.

Por tanto, este artículo deja claro como la distribución de la masa sobre el sustrato depende en gran medida de la geometría de la boquilla y de la presión con la que se inyecta el flujo de material transportador a través de la misma. Esto significa que en caso de establecer valores tabulados en cuanto a la distribución de la masa proyectada, deben ser únicos para cada boquilla y dependientes de la presión de proyección.

Sin embargo, para este estudio, se empleará una única boquilla para materiales de proyección metálicos y otra para cerámicos. Y se extraerán conclusiones para cada una de ellas por separado y reglas comunes a ambas en caso de que sea posible. Por tanto, siempre se trabajará con la misma presión para los gases que generan la llama (oxígeno y acetileno) con el fin de obtener una llama neutra y, en cambio, la presión del aire comprimido que impulsa las partículas será

regulada según las necesidades del material, tal como especifica el fabricante en el propio soplete:



Figura 12: Indicaciones del fabricante acerca de los gases.

- **Alexander Kout, Heinrich Müller, Parameter optimization for spray coating, Advances in Engineering Software 40 (2009) 1078–1086**

Este artículo señala que en el ámbito de la planificación de la trayectoria de la pulverización se pueden distinguir dos enfoques principales: la planificación automática de rutas en línea sin un modelo de pieza de trabajo; y la planificación de ruta basada en un modelo de pieza de CAD.

Para el segundo, que se encuentra en el enfoque de este artículo, se han propuesto varias soluciones basadas en formulaciones como un problema de optimización. En el artículo hacen referencia a posibles soluciones planteadas hasta el momento. Se proporciona una formulación integral como un problema de optimización y se discuten los posibles enfoques de su solución. Además de la mejora local como enfoque de optimización, interpretan la planificación de la trayectoria como un problema de cálculo de variaciones y describen métodos para transferirla a un problema de optimización de dimensión finita. También se presentan dos versiones de especificaciones de problemas, una que asume una geometría de ruta fija y otra que asume una clase de trayectorias factibles especificadas por restricciones. Ambas versiones se convierten en problemas de

programación no lineal, y se observa para el segundo caso que los requisitos computacionales son demasiado altos en la práctica. Por otro lado, hacen referencia a una corrección de la geometría de la trayectoria y sus formulaciones de funciones objetivas que conducen a problemas de programación lineal o cuadrática que pueden resolverse hasta tres órdenes de magnitud más rápido que el programa no lineal general anteriormente descrito. Se plantea la posibilidad de restringir la geometría de la ruta a un patrón muy específico de las rutas de barrido paralelas, lo cual permite una solución muy eficiente, pero es de uso limitado en superficies complejas de forma libre debido al patrón de ruta especial.

Estas son las principales visiones que se ven reflejadas en el artículo, y que muestran, sin duda el escaso grado de homogeneización de criterios de los métodos, así como una clara complejidad que dificulta que sean llevadas a la práctica. De nuevo, se deduce la necesidad de un método genérico que no recurra a complejos cálculos.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el objetivo de la planificación de los procesos de revestimiento mediante proyección térmica orientados a la trayectoria es encontrar una secuencia continua dependiente del tiempo de las configuraciones/trayectorias de la pistola de proyección, de modo que se obtenga un revestimiento del espesor deseado al ejecutar la secuencia. Este artículo describe un enfoque novedoso para resolver la tarea de planificación, llamado "geometría última", que conduce a un problema más general de la cobertura de la configuración de la pistola. El problema de la cubierta de la configuración de la pistola es encontrar un conjunto finito de configuraciones de la pistola rociadora, que minimice el error entre un recubrimiento objetivo y el recubrimiento inducido al activar simultáneamente esas configuraciones. Se define una función objetivo adecuada para las cubiertas de configuración de pistola, y se presentan soluciones algorítmicas para el problema de optimización, incluida la aceleración por jerarquización y el uso de hardware de gráficos. Una evaluación experimental muestra que se pueden lograr buenas aproximaciones de los recubrimientos deseados dentro de tiempos de cálculo razonables. En

contraste con otros enfoques, la última geometría obtiene la flexibilidad adicional requerida para encontrar rutas complejas para piezas de forma libre.

Este artículo busca la optimización de los parámetros, aunque en el caso de superficies más complejas, mientras que en nuestro caso se pretende analizar un caso genérico y, por tanto, se estudiará inicialmente sobre superficies más sencillas con la finalidad de definir la trayectoria que minimice las pérdidas teniendo en cuenta el número de pasadas necesarias para generar el recubrimiento deseado.

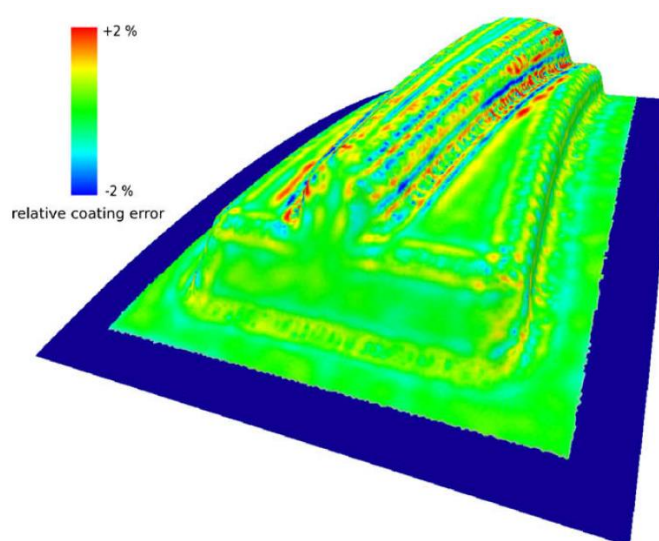


Figura 13: Ejemplo análisis precisión recubrimiento.

- **John G. Goedjen, Robert A. Miller and William J. Brindley, A simulation technique for predicting thickness of thermal sprayed coating, <https://ntrs.nasa.gov>**

En este estudio desarrollado por la Nasa en 1995 se realizó un complejo cálculo teórico y una posterior comprobación empírica, mientras que en el presente estudio se combinarán ambas, con cálculos simplificados, para obtener un modelo aproximado de forma más simple.

Se plantea el desarrollo de un enfoque generalizado de diferencias finitas utilizando el análisis simple de vectores y las técnicas de diferencias finitas. Propone asumir como aproximación que el sustrato se divide en una parrilla de pequeñas regiones cuadradas, de tal modo que el espesor en cualquier punto del componente se determina a través del paso del tiempo y la acumulación de material en el punto durante el ciclo de pulverización.

$$T = \iint A \cdot \exp\left(-\frac{\rho(x, y, t)^2}{\sigma^2}\right) \cdot \partial x \partial y$$

En cuanto al desarrollo experimental, se utilizó como sustrato un disco de acero inoxidable que rotaba a 360 rpm y sobre el cual se proyectó mediante plasma un polvo de circonia. Cabe destacar que en este caso el movimiento era controlado por un robot.

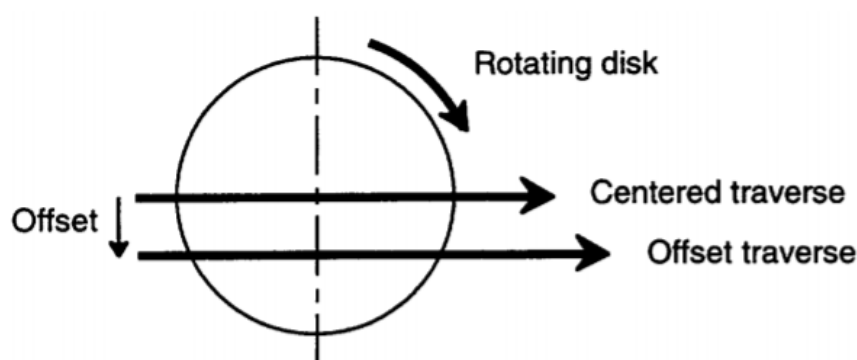


Figura 14: Esquema de la trayectoria descrita por el robot.

Una conclusión importante que se extrae de este experimento publicado en 1995 es que el perfil de deposición sigue claramente un patrón gaussiano. Para unos ciertos valores de proyección (número de pasadas, velocidad de desplazamiento...) se obtiene que el perfil del volumen generado se corresponde con una normal de media 0,64 cm y una desviación típica de 0,41 cm. Aunque no se hace referencia al error entre la medida experimental y la teórica, se puede observar en la siguiente imagen que la aproximación es razonablemente válida.

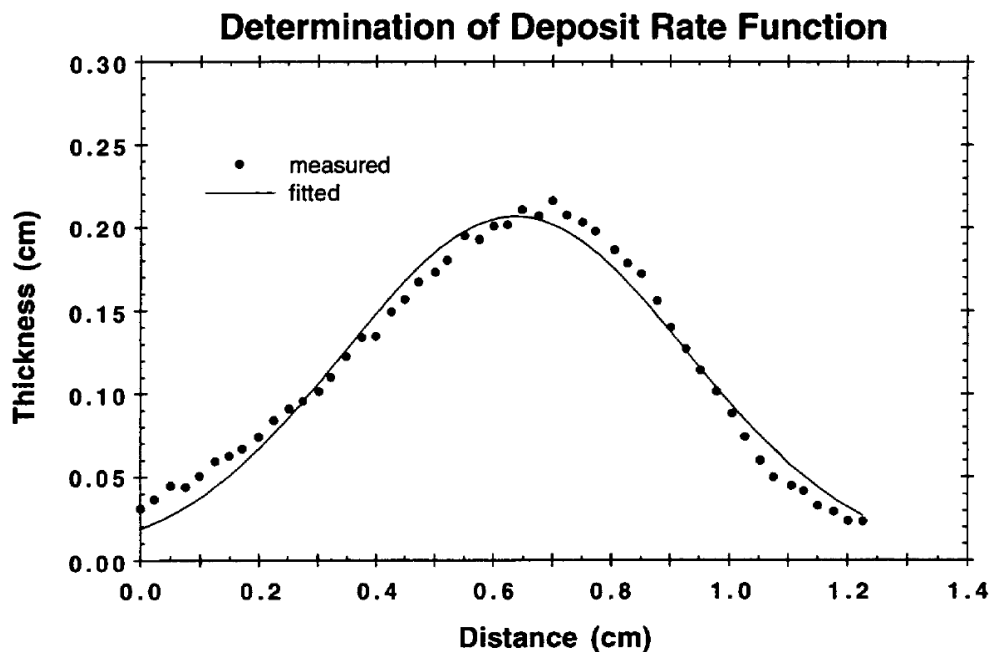


Figura 15: Comparativa flujo de deposición teórico y empírico.

En este caso, se observa que los cálculos guardan mayor independencia respecto del tipo de geometría del elemento empleado como sustrato pero mantienen la complejidad.

- **C. Chen, Y. Xie, C. Verdy, H. Liao, S. Deng, Modelling of coating thickness distribution and its application in offline programming software, Surface & Coatings Technology 318 (2017) 315-325**

A pesar de que focaliza en el rociado en frío y, especialmente, en analizar en qué medida afecta el ángulo de proyección a la tasa de deposición, proporciona información relevante referente al tratamiento de los perfiles de proyección como distribuciones normales. Además, compara proyecciones experimentales con la curva teórica del proceso. Es decir, de forma similar al anterior, se comparan los resultados experimentales para un determinado caso de proyección con una aproximación teórica de una curva que representa una distribución normal.

El enfoque dado al cálculo teórico es prácticamente el mismo que el que se da en el artículo de la Nasa anteriormente presentado: Al integrar la distribución gaussiana en cada punto de la trayectoria, se puede obtener la distribución del espesor del recubrimiento en toda la superficie del sustrato. En este proceso, la superficie del sustrato se malla como una rejilla amplificada con un tamaño de cuadrícula constante.

Esta distribución se considera de media nula y se genera mediante una proyección perpendicular al sustrato, tal como muestra la figura 16:

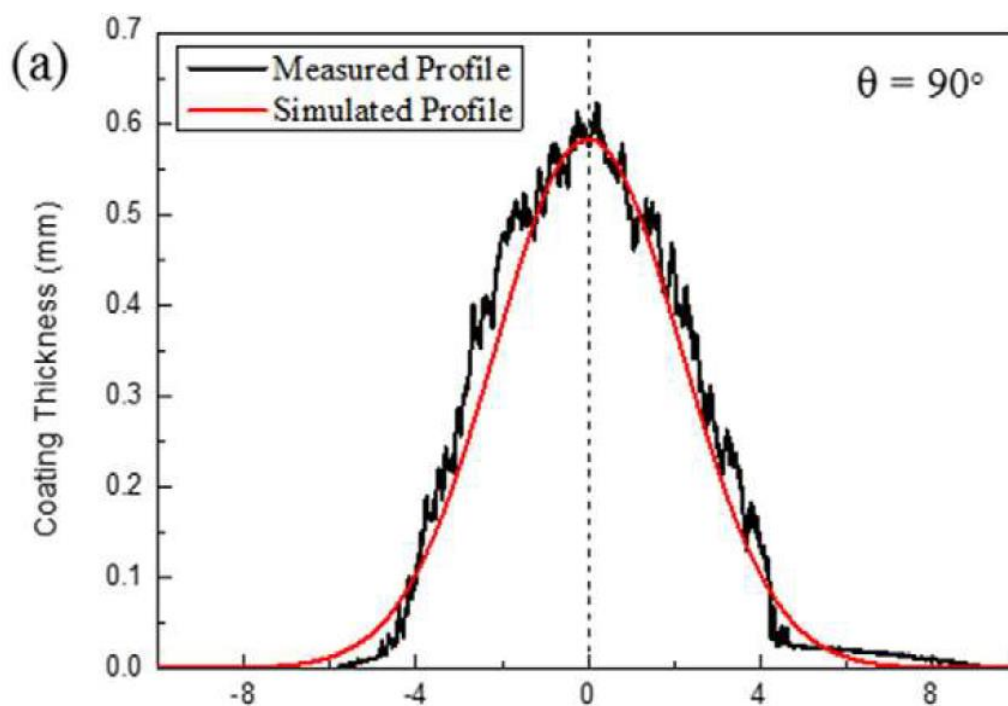


Figura 16: Comparativa perfil experimental y simulado.

De esta forma, en el espacio, la geometría dada, tal como expone este último artículo citado, es la siguiente:

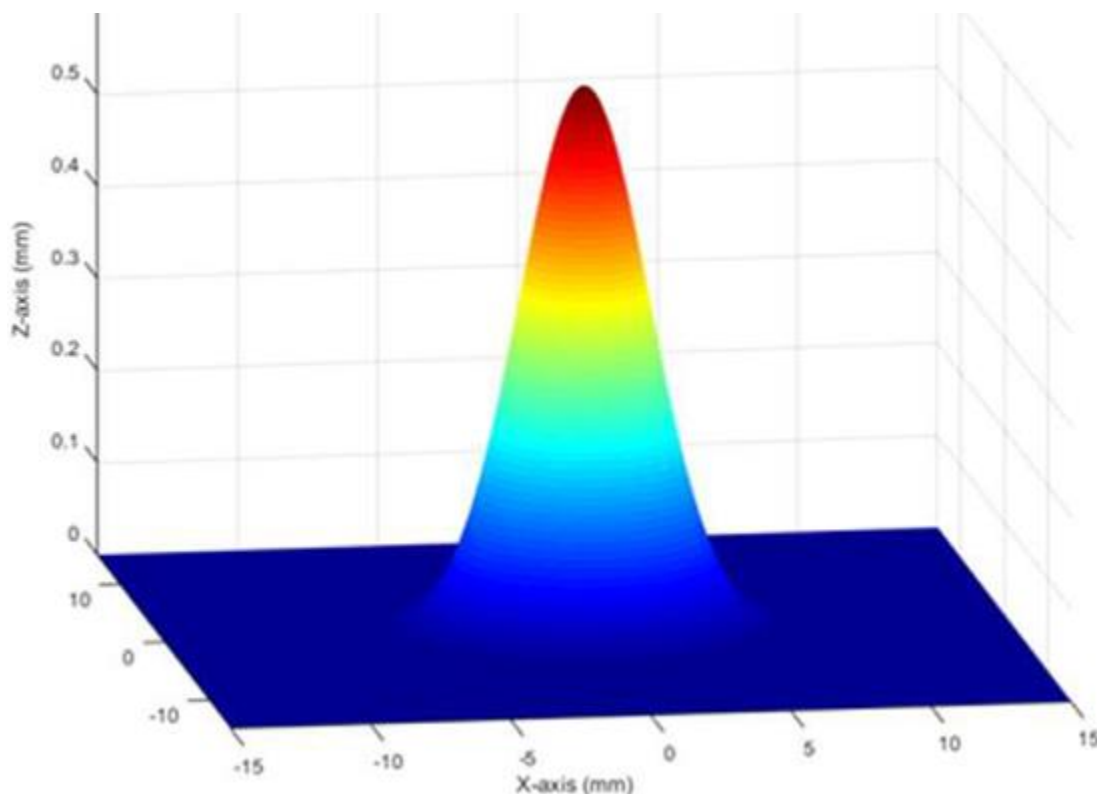


Figura 17: Representación tridimensional de la distribución de masa en un caso de proyección a 90°.

- **Z. Djuric, P. Grant, An inverse problem in modelling liquid metal spraying, Oxford Centre for Advanced Materials and Composites, Department of Materials, University of Oxford**

Este documento aborda algunos de los problemas más importantes en el modelado de procesos de deposición de rociado de metal: la distribución del flujo de masa espacial dentro del cono de rociado producido por la fuente y la “eficacia de rociado” (término que hace referencia a un parámetro similar a la denominada “tasa de deposición”, pero no idéntico) al depositar material sobre el sustrato.

El modelo se basa en un enfoque continuo de la pulverización de metales líquidos: la función de distribución de flujo de masa se deriva de observaciones experimentales y la restricción de preservación de masa; por lo que el modelo depende de los parámetros de pulverización de la fuente y de las funciones de modelado.

Para impactar el sustrato, las gotitas de metal líquido se desintegran de una manera compleja, ya que, una fracción de la masa total recibida permanece en el punto de impacto, mientras que el resto se salpica y se vuelve a depositar en otro lugar. La relación de la masa retenida sobre la masa total alcanzada se denomina eficiencia de adherencia.

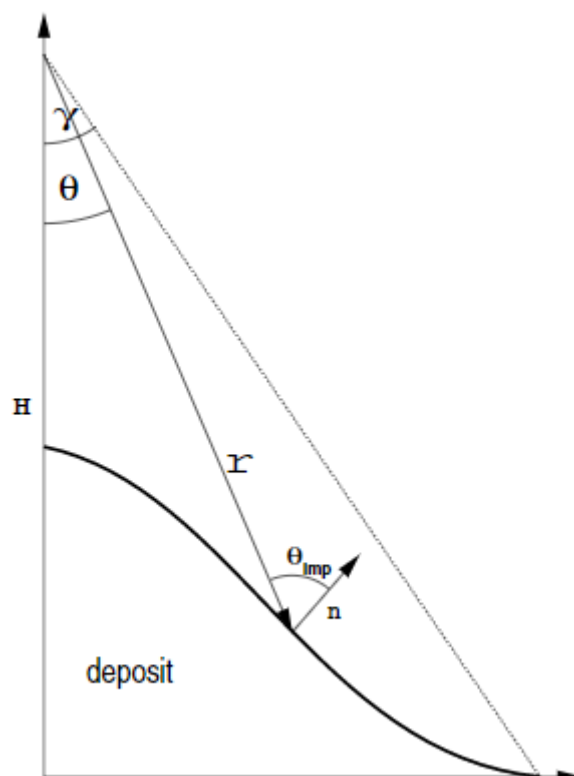


Figura 18: Esquema correspondiente a una mitad simétrica de sección transversal vertical a través del depósito.

Los cálculos desarrollados en este artículo son de una elevada complejidad ya que se plantea que este parámetro, la eficiencia de adherencia, es la solución de un problema inverso. El cual es no lineal y se transforma en un problema de valores abundantes, que se resuelve utilizando métodos para una generación de cuadrícula curvilínea. Además, se obtienen datos experimentales de depósitos estacionarios pulverizados.

5.3 DESARROLLO EMPÍRICO

Esta parte del trabajo se correspondió con las prácticas externas realizadas en el grupo de investigación de materiales avanzados de esta universidad. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para la obtención de muestras de diferentes tipos para su posterior estudio, las cuales ya fueron introducidas en la memoria de dichas prácticas, cuya finalidad era:

Por una parte, recopilar la información suficiente a partir de las proyecciones realizadas de forma que permitan modelar la distribución del flujo de masa correspondiente a las partículas fundidas o semifundidas que se proyectan con el fin de depositarlas sobre el sustrato para generar un recubrimiento y a partir de este modelo poder calcular el volumen de material que impactará en el sustrato y el que, por el contrario, se perderá y así estimar el coste asociado a estas mermas.

Por otra parte, mediante el cálculo de diferencias de masas antes y después de la proyección (del sustrato y de la cantidad de material proyectado) se procede a evaluar el porcentaje de material proyectado que ha quedado realmente adherido al sustrato.

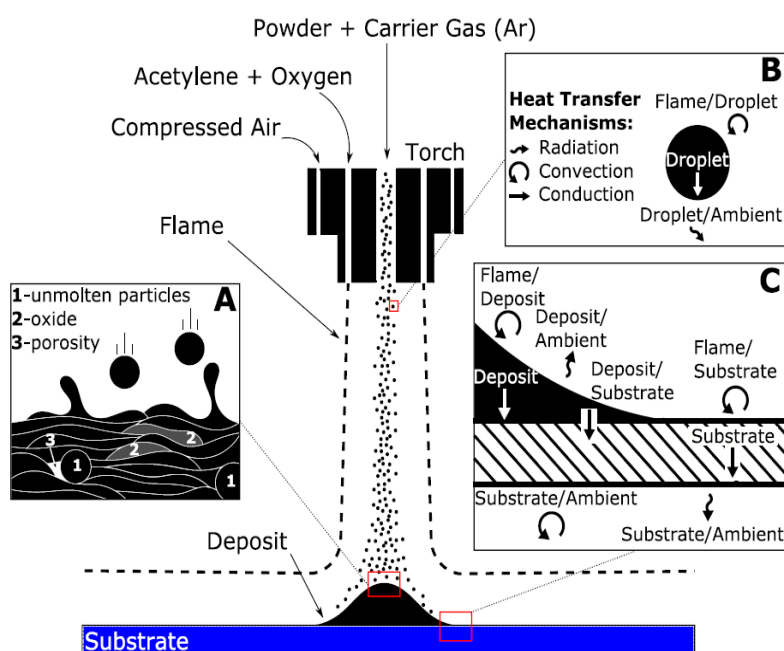


Figura 19: Esquema del procedimiento experimental.

Además, durante la realización de estas prácticas, se emplea un material nanoestructurado para analizar cómo y en qué medida afecta su adición al material de proyección a los distintos parámetros de deposición del mismo.

Cada uno de los aspectos descritos en este apartado fueron supervisados, y las partes experimentales, realizadas, por un experto en la materia, el doctor Kudama, quién aseguraba en todo momento el cumplimiento de las normas presentadas en el apartado cuarto de este documento.

5.3.1 ENSAYOS

Se realizaron un total de 21 ensayos, todos ellos sobre un mismo sustrato, azulejos cerámicos, para tener siempre las mismas condiciones de adherencia, y proyectando materiales cerámicos y metálicos. Para ello se emplearon, como ya se ha comentado, dos tipos distintos de boquillas, una para cada tipo de material. Todas las características tanto de los sustratos como de los polvos proyectados como del material de laboratorio empleado son detalladas en el apartado de materiales.

5.3.1.1 PREVIOS

Desde el principio se consideró que se realizarían proyecciones con polvos de tres materiales distintos: un material cerámico, para el cual se emplearía una boquilla específica y unos ciertos parámetros de proyección, y dos de base metálica, para los cuales la boquilla y los parámetros de proyección serían distintos. La elección de la boquilla para cada proyección fue realizada por el supervisor de las prácticas, en el apartado de materiales se detalla las características de cada una de ellas. En cuanto a los parámetros de proyección, mediante estos ensayos preliminares se pretendía comprobar si la elección de los materiales era apropiada para la proyección sobre el sustrato elegido y para

establecer algunos parámetros como la cantidad de material a proyectar, los porcentajes de material nanoestructurado que debíamos añadir, o la distancia de proyección.

Se realizó un primer ensayo con polvos de Alúmina/Titanio, ya que es uno de los materiales más empleados en la industria para generar recubrimientos (en el apartado de materiales se detallará esta información), en el que se realizaron varias proyecciones (alguna de ellas incluyendo un pequeño porcentaje de grafeno, en torno a 0,5%), que consistían en dirigir el flujo de material fundido hacia un punto concreto del sustrato (aproximadamente centro del azulejo) para estudiar el tiempo necesario para generar un volumen de recubrimiento cuyo perfil de grosor fuese suficientemente perceptible como para extraer la altura de distintos puntos y desarrollar el estudio pertinente de la distribución de alturas para así caracterizar el flujo de masa.

Claramente, cuanto mayor es esta cantidad mejor se distingue el perfil del recubrimiento generado, pero, evidentemente, también aumentan los gastos relativos a la materia prima para la proyección.

De este modo, se consideró que una cantidad de material apropiada para ser proyectada por completo sobre un punto eran 25 g, ya que las primeras proyecciones con el ya nombrado material cerámico mostraron que con 12,5 g se empezaba a generar un perfil perceptible. Tras estas pruebas iniciales, se estableció, que para los materiales metálicos se proyectaría el doble de cantidad.

Siguiendo las premisas indicadas en el primer párrafo, los materiales escogidos fueron: Alúmina/Titanio como material cerámico y un material de base cromo y otro con base níquel como metálicos. Además, el material nanoestructurado escogido para adicionar a los polvos que serían proyectado, como ya se ha dicho, fue el grafeno (las características concretas de todos los materiales serán detalladas en el siguiente apartado).

Se optó por preparar dosis de 50 mg de cada combinación de materiales: sin aditivos, con un 0,3% en masa de grafeno y con un 1% (el método de preparación de las mezclas también será detallado en el próximo apartado), para poder realizar más de una proyección con cada mezcla.

Las primeras proyecciones con materiales metálicos no tuvieron los resultados esperados, en ambos casos la cantidad y, por ende, el tiempo de proyección fue excesivo. En el caso del material con base Níquel, se produjo una fractura total del sustrato debido al calentamiento producido por la exposición a la llama del soplete durante demasiado tiempo, pero la geometría generada por la acumulación de material fue la esperada, como demuestran las siguientes imágenes:



Figura 20: Volumen generado tras la proyección.

Como se puede observar, el material ha perdido adherencia, probablemente debido un mal diseño del experimento en cuanto a cantidad de material a proyectar se refiere.

Para obtener el perfil del volumen con el que trabajar se realiza una fotografía de gran resolución de un plano perpendicular al sustrato (en el apartado referente a los métodos se detallará el proceso de edición fotográfica).

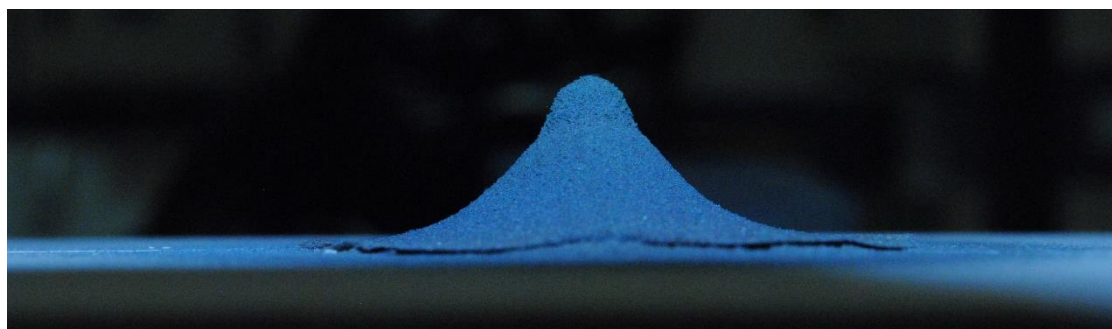


Figura 21: Imagen de alto contraste del perfil del volumen generado.

Además, a pesar de no ser una muestra perfecta debido a la rotura producida, este perfil generado en este ensayo preliminar fue empleado para extraer puntos dentro de un sistema de coordenadas previamente establecido y comprobar la hipótesis de que la deposición del material se regía aproximadamente, en mayor o menor grado, por una distribución normal.

En este caso, la obtención de esta serie de puntos se realizó de forma manual sobre la fotografía y con una muestra relativamente escasa. Una vez validada esta hipótesis se procederá al desarrollo de un método que permita tener un grado de automatización mayor. Este será descrito en los próximos apartados.

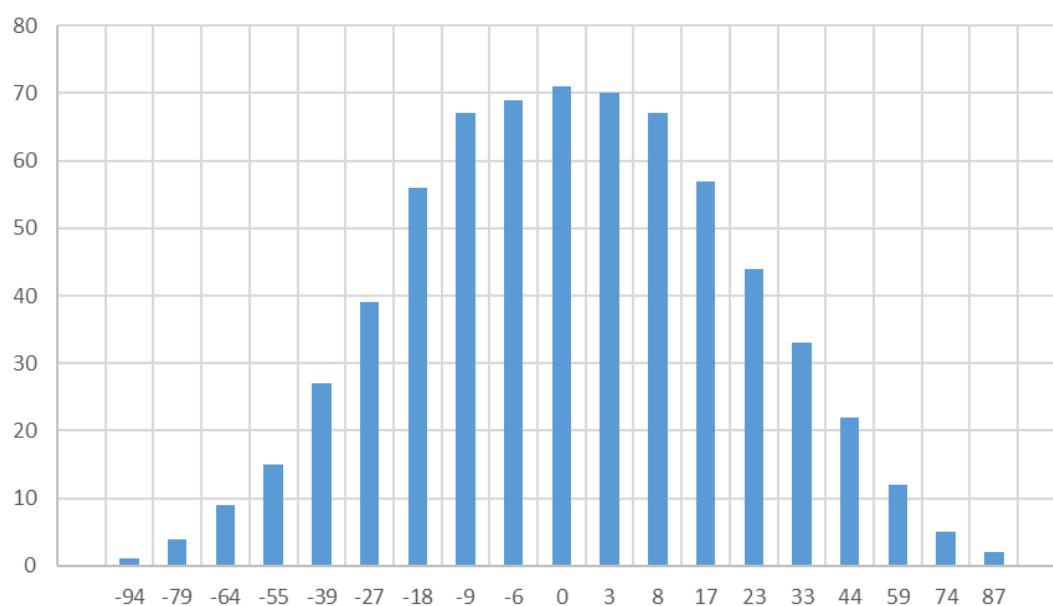


Figura 22: Histograma realizado con los puntos extraídos del perfil fotografiado.

Y, en el caso del polvo con base cromo, el resultado de la proyección fue, como se puede observar en la fotografía, desastroso. Debido a una mala elección la adherencia del material proyectado no fue la esperada, por lo que no fue posible conseguir un volumen válido para analizar. Por este motivo el material fue sustituido por otra aleación de base níquel.



Figura 23: Proyección fallida de aleación de base Cromo.

Por tanto, este ensayo preliminar sirvió para constatar la validez del material cerámico y del de base níquel para seguir con el estudio, aunque sería necesario ajustar los parámetros, y para descartar y sustituir el material con base cromo por otro. Además, como se ha comentado, se decidió sustituir el material con base cromo por una aleación de aluminio y níquel, con la que se comprobó que

el recubrimiento resultante tras la proyección era más apropiado para el estudio deseado.

De este modo, como 12,5g resultó ser una cantidad insuficiente y 25g excesiva, se optó por proyectar dosis 18g en una segunda ronda de ensayos preliminares, en la que los resultados mejoraron considerablemente y se consideraron válidos los parámetros definidos.

5.3.1.2 PUNTUALES

Una vez definidos los materiales a proyectar, el sustrato y teniendo claro la cantidad de masa que es coherente aplicar para este tipo de ensayo, se procedió a realizar 9 proyecciones, tres por cada material, como ya se ha introducido anteriormente:

- Sin adición de partículas de grafeno.
- Con un 0,3% en masa de grafeno.
- Con 1% en masa de grafeno.

Este tipo de ensayos fueron de carácter estático, manteniendo (dentro de las posibilidades al tratarse de un método de proyección manual) el soplete apuntando aproximadamente al centro del sustrato para de esta forma generar una huella con un cierto relieve, del cual a posteriori serán estudiadas las distribuciones del grosor acumulado en cada punto de esta huella.

Además, se pretende analizar la relación entre la adición de un material nanoestructurado, en este caso grafeno, con la tasa de deposición del material pulverizado sobre el sustrato. Es decir, conocer el porcentaje de masa del material que finalmente queda adherido al sustrato respecto del material que ha sido proyectado. La cantidad total proyectada es conocida: fue definida, como se ha especificado en el apartado anterior en 18g por los motivos ya expuestos; y la cantidad adherida al azulejo fue calculada mediante la diferencia entre la masa del azulejo más el material adherido menos la masa inicial del azulejo, con una

precisión de miligramos, como se podrá observar más adelante en el apartado de cálculo. Los instrumentos de laboratorio empleados para realizar todas las mediciones también serán especificados más adelante, en el apartado de materiales.

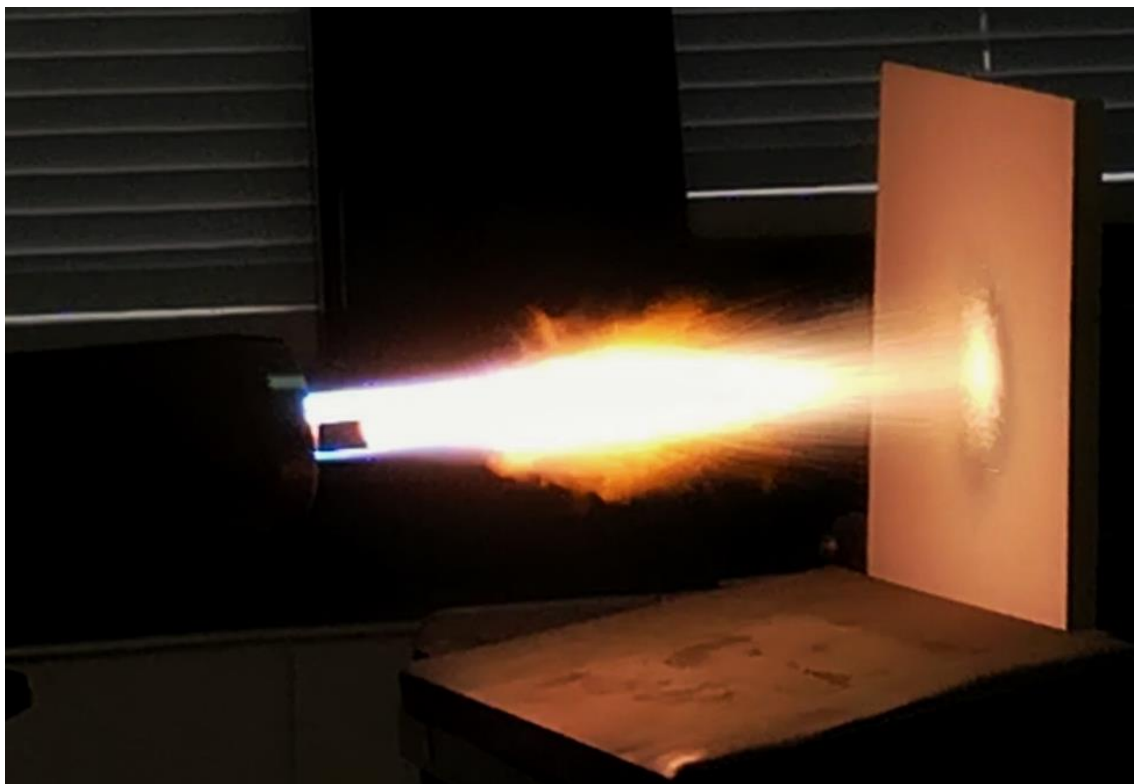


Figura 24: Ejemplo de proyección puntual.

Cabe destacar que, como ya se ha dicho, el sistema de proyección por llama es manual, y por tanto está sujeto a posibles errores humanos, por ello esto se tuvo en cuenta y se intentó fijar la posición de todos los elementos en la medida de lo posible para no afectar al resultado. A pesar de las precauciones tomadas, el posible calentamiento excesivo del sustrato (y por tanto, posible rotura que conduciría a la invalidez de la muestra) obligó a desarrollar las proyecciones con interrupciones, es decir, apartando el soplete del sustrato y volviendo a la posición de proyección al cabo de algunos segundos para facilitar la reducción de temperatura del azulejo, por lo que esto también podía inducir a errores en el resultado final del recubrimiento alterando la naturaleza de la distribución de la masa sobre el sustrato.

Teniendo en cuenta lo presentado en el párrafo anterior, se comprobó que todas las proyecciones presentaban aproximadamente un perfil de alturas correspondiente de forma aproximada a una campana de Gauss. En caso de duda, bien por errores en la proyección o por irregularidades en el resultado (no fue el caso), se procedía a la repetición de la proyección en cuestión.

Una vez obtenidas todas las muestras, se procedió a pesar todos los azulejos con su respectivo material adherido y calcular la masa de material que había quedado unida al azulejo (como ya se ha dicho, restando el peso inicial del azulejo) y mediante la siguiente fórmula, obtener la tasa de deposición para cada material y en función de la cantidad de grafeno (para observar la influencia de éste).

$$T (\%) = \frac{(m_{f_{AZ}} + m_{ad}) - m_{0_{AZ}}}{100}$$

Tras realizar estos cálculos, se seleccionó la muestra más interesante desde el punto de vista de la influencia del grafeno para cada boquilla empleada. Y se considera para cada boquilla porque una de las hipótesis de partida en este estudio es que la distribución de masa, y por tanto, teniendo en cuenta la otra hipótesis de que ésta sigue una distribución normal, la desviación típica que caracteriza a ésta segunda, depende principalmente de la geometría de la boquilla empleada en el soplete (aunque, probablemente, otras magnitudes tales como la densidad del material a proyectar, su granulometría o la distancia de proyección puedan afectar este valor ligeramente). Esta hipótesis es válida por uno de los artículos citados en el apartado anterior, “Spray characteristics of pressure-swirl nozzles at different nozzle diameters”, en el cual, se relaciona de forma directa la forma del cono de proyección (y la distribución de partículas en él) con el grado de turbulencia del flujo en el interior del soplete.

En este punto es importante hacer referencia a que, al tratarse de un proyecto de investigación, en este documento se presentan los resultados únicamente de las técnicas que dieron buenos resultados. Sin embargo, en referencia a lo citado

en el párrafo anterior, se valoró la posibilidad de realizar simulaciones mediante software CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Esta opción permitiría tener información detallada de las partículas durante el vuelo, pero tuvo que ser descartada por varias razones: se requería un modelado detallado del interior de la boquilla, para lo cual son datos que en ocasiones ni si quiera son proporcionados por el fabricante/distribuidor; y, además, es una opción que no permitiría una solución genérica como pretendemos, sino que se trataría de una solución únicamente para un modelo de pistola.

Una vez hecho este inciso, siguiendo con lo anterior, se escogió un recubrimiento generado por una boquilla y otra por otra (los que se consideraron que habían sido generados con mayor exactitud y que visualmente presentaban más claramente la geometría característica de la campana de Gauss), es decir, uno de los tres cerámicos y unos de los seis metálicos.



Figura 25: Imagen procesada de un perfil de recubrimiento puntual (dimensiones no reales).

La geometría, y más concretamente la distribución de los grosores, de estos dos recubrimientos fueron estudiados en profundidad de la siguiente forma:

En primer lugar, se realizaban fotografías en alta resolución desde un plano perpendicular al sustrato para obtener las vistas laterales del perfil de alturas del volumen de material producido (en el apartado de materiales y métodos se

profundiza en el método fotográfico empleado para obtener los mejores resultados posibles y se explicará por qué fue este método el escogido y por qué se descartaron otros, como realizar un corte de precisión), de las cuales se escogía uno de los perfiles de forma aleatoria, dado que se comprobó que se podían considerar los cuatro perfiles prácticamente iguales (como se puede observar de forma gráfica en la figura 25) y las pequeñas diferencias se debían a fallos en el desempeño manual del proceso) y mediante técnicas de retoque fotográfico se extraía solamente el perfil del volumen para de esta forma extraer más de 500 puntos en el plano posicionando este “fragmento” de fotografía sobre un papel con divisiones uniformes (cuyas dimensiones eran conocidas).

En el apartado de cálculos se detallará como se extrae de esta serie de puntos la desviación típica de la normal teórica con media nula que más se aproxima a la representación del perfil de proyección.

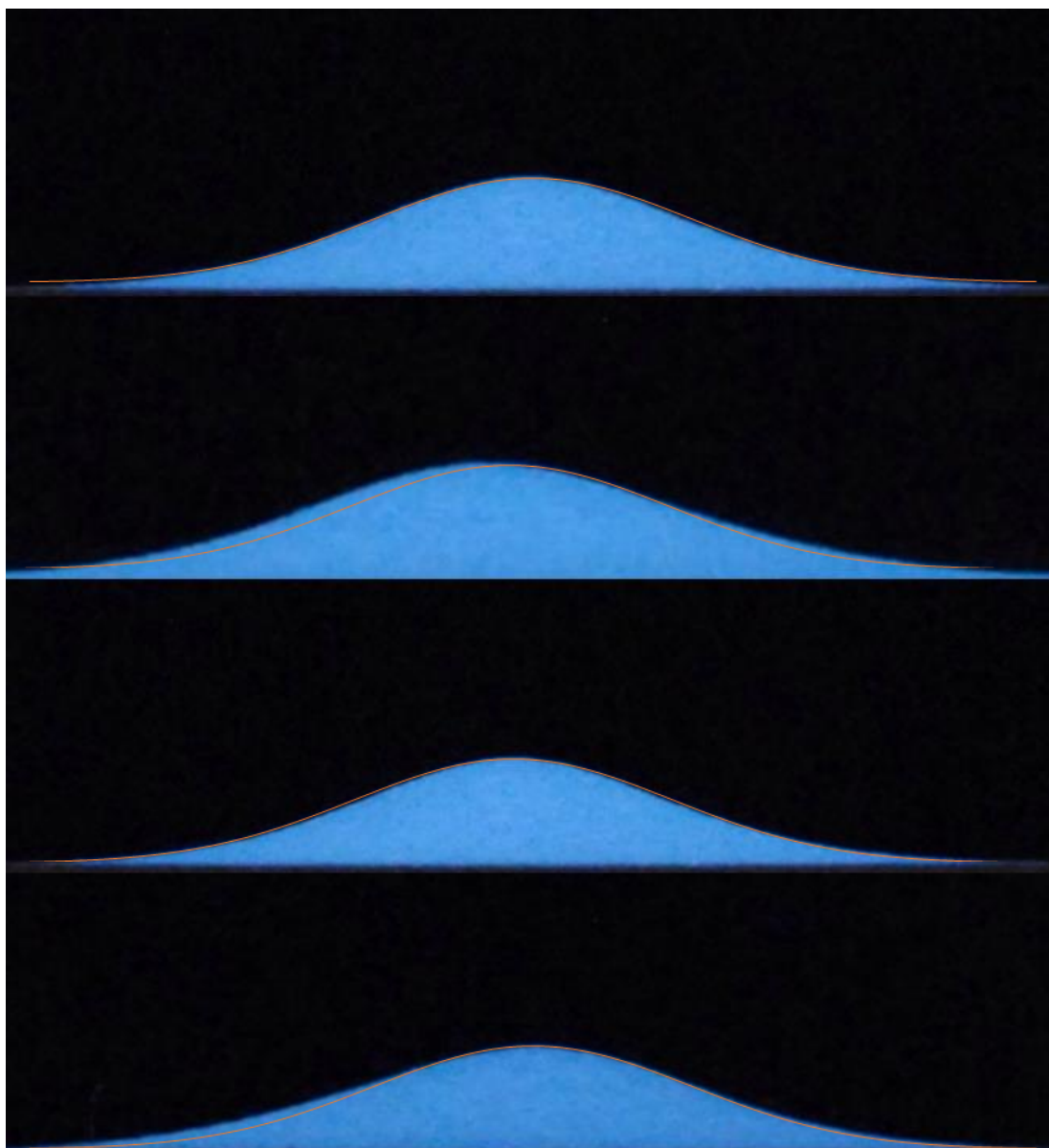


Figura 26: superposición de una misma curva sobre los 4 perfiles de una proyección.

5.3.1.3 DE TRAYECTORIA

Tras realizar las muestras puntuales que nos permiten conocer la distribución de la masa adherida sobre el sustrato, se llevan a cabo 5 proyecciones, cada una sobre un azulejo del mismo tipo que los anteriores, para recubrirlos por completo siguiendo una determinada trayectoria. La finalidad de estas proyecciones es comprobar que los datos extraídos del apartado anterior son válidos y nos

permiten calcular el volumen depositado conociendo la desviación típica de la distribución, el volumen de material que ha salido del soplete (se calcula conociendo la masa y la densidad del material), la tasa de deposición característica de ese proceso (obtenida de forma experimental mediante el ensayo puntual) y la trayectoria descrita por el soplete sobre el sustrato (teniendo en cuenta que en ocasiones no todo el material proyectado impacta sobre el sustrato).

Para finalizar todo el proceso ya explicado, mediante el uso de los datos extraídos, se procede al realizar una predicción de las pérdidas de material en función de la trayectoria descrita por el soplete. Tanto el cálculo como las trayectorias serán simplificados al máximo, ya que la finalidad de este estudio es desarrollar un método que permita el cálculo de estas mermas, pero el cálculo en sí mismo escapa al interés de este.

Durante el proceso de proyección de dichos azulejos, se distinguirán dos posiciones: proyectando en el centro del azulejo o proyectando en un borde; se medirá el tiempo de permanencia en cada una de las posiciones y estableciendo una relación entre ambas se aproximará a una trayectoria rigurosa de zigzag como la ya detallada (ya que es, aproximadamente, lo que se hace de forma manual). De este modo, y de nuevo teniendo en cuenta la tasa de adhesión, así como la densidad del material, se podrá predecir la masa de material adherida y la masa perdida. Nuevamente, como en los ensayos puntuales, se obtendrán estos últimos valores de forma empírica por diferencia de masas, antes y después de la proyección.

Por tanto, cualquier trayectoria será simplificada a una de zigzag, es decir, consistente en: recorrer, desde una esquina del azulejo hasta la contigua siguiendo el borde del mismo, en este punto, iniciar un movimiento perpendicular la anterior de tal forma que la proyección se “adentre” en el sustrato siguiente el borde hasta un cierto punto a determinar (se trata de una de las variables que habría para el cálculo que nos concierne), desde el cual iniciaría de nuevo un movimiento paralelo al primero pero en la dirección opuesta, hasta llegar al otro extremo, donde de nuevo iniciaría un movimiento perpendicular siguiendo la

dirección del segundo y así sucesivamente hasta llegar a la esquina del azulejo opuesta a la que se inició el proceso.

La descripción del cálculo desarrollado para obtener la cantidad de material que finalmente queda depositado sobre el sustrato será detallada en el apartado de cálculos. A pesar de ello, a continuación, se expone brevemente el procedimiento.

En lugar de tomar como referencia el volumen puntual analizado anteriormente y calcularlo mediante integración para obtener el volumen total por superposición de volúmenes, simplemente se calculará el área bajo la curva de la campana teórica y se multiplicará por la trayectoria. Para realizar el cálculo con la mayor precisión posible, es importante destacar que el tiempo de proyección del ensayo puntual es conocido. Esto nos permitirá calcular el resultado en función de la velocidad de avance y desplazamiento del soplete. En este caso, como ya se ha anunciado, el cálculo será simplificado al máximo, por lo que se considerará una velocidad de avance constante e igual para todos los movimientos de desplazamiento descritos, sea cual sea su dirección o sentido.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

A continuación, se realiza una breve descripción del material empleado para realizar el desarrollo empírico de este estudio, así como de los métodos empleados para la extracción de los resultados.

6.1 MATERIAL

Se exponen tanto los elementos requeridos para la proyección como los necesarios para la preparación de las muestras.

6.1.1 AZULEJOS

Se requería un sustrato igual para todas las proyecciones, para trabajar en las mismas condiciones de adhesión. En un primer momento se valoró la posibilidad de realizarlas sobre chapas de acero, pero fue descartada esta opción, entre otras cosas, por el mecanizado requerido.








Figura 27: Azulejos empleados como sustrato.

Se optó por los azulejos ya que son piezas cuyas características son detalladas por el fabricante, su disponibilidad era inmediata y las medidas y geometría de los mismos eran apropiadas para el tipo de experimento que se iba a llevar a cabo.

Concretamente se trata de baldosas cerámicas prensadas en seco, con unas dimensiones de 123 mm x 123 mm y un grosor de 7 mm. En cuanto a las propiedades de este material proporcionadas por el fabricante, podemos destacar:

- Absorción de agua: $E_b \leq 0,5\%$.
- Modulo de rotura mínimo: 700 N.
- Fuerza de rotura mínimo: 32 N/mm².
- Resistencia química: GLA.
- Resistencia al agrietamiento.

WOW TECHNICAL FEATURES / INFORMACIÓN TÉCNICA			
TECHNICAL FEATURES FOR DRY-PRESSED CERAMIC TILES WITH WATER ABSORPTION B I a ($\leq 0,5\%$) CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA LAS BALDOSAS CERÁMICAS PRENSADAS EN SECO CON ABSORCIÓN DE AGUA B I a ($\leq 0,5\%$)			
FEATURES / CARACTERÍSTICAS	SPECIFICATION / ESPECIFICACIÓN		NORMA
 Water absorption.	$E_b \leq 0,5\%$		UNE-EN ISO 10545-3:1997
 Modulus of rupture and breaking strength.	Thickness $\geq 7,5$ mm Min 1300 N Thickness $< 7,5$ mm Min 700 N	Minimum 35 N/mm ² Individual Minimum 32 N/mm ²	UNE-EN ISO 10545-4:2012
 Chemical resistance.	GLA		UNE-EN ISO 10545-13:1998
 Crazing resistance.	Pass		UNE-EN ISO 10545-11:1997
 Household products resistance.	GA		UNE-EN ISO 10545-13:1998
 Stain resistance.	>3		UNE-EN ISO 10545-14:1998
 Frost resistance.	Pass		UNE-EN ISO 10545-11:1997
 Slip resistance.	R9 / Class 2 $>0,50$		DIN 51130:2014 ANSI A137.1:2012

Dry-pressed ceramic tiles with water absorption B I a $\leq 0,5\%$ for internal and external walls and floors. Baldosas cerámicas prensadas en seco con absorción de agua B I a $\leq 0,5\%$ para suelos y paredes interiores y exteriores.		
Reaction to fire / Reacción al fuego	A1	
Bond strength: adhesion: cement adhesive type C2 / Adhesión: adhesivo cementoso tipo C2	$> 1,0$ N/mm ²	
Durability for internal use / Durabilidad para usos interiores	Pass / Cumple	
Temperature shock resistance / Resistencia al choque térmico	Pass / Cumple	
Modulus of rupture: Thickness $\geq 7,5$ mm / Módulo de rotura: Espesor $\geq 7,5$ mm	Minimum 35 N/mm ²	
Modulus of rupture: Thickness $< 7,5$ mm / Módulo de rotura: Espesor $< 7,5$ mm	Individual Minimum 32 N/mm ²	

"No se aceptarán reclamaciones una vez instalado el material"
"No claims will be accepted after materials have been installed"

Figura 28: Información técnica del fabricante.

6.1.2 SOPLETE

En este caso se ha empleado la tecnología disponible en esta universidad, un soplete de llama oxiacetilénica del fabricante Castolin Eutectic. Se trata del modelo CastoDyn DS 8000, el cual no requiere habilidades especiales para operarlo.

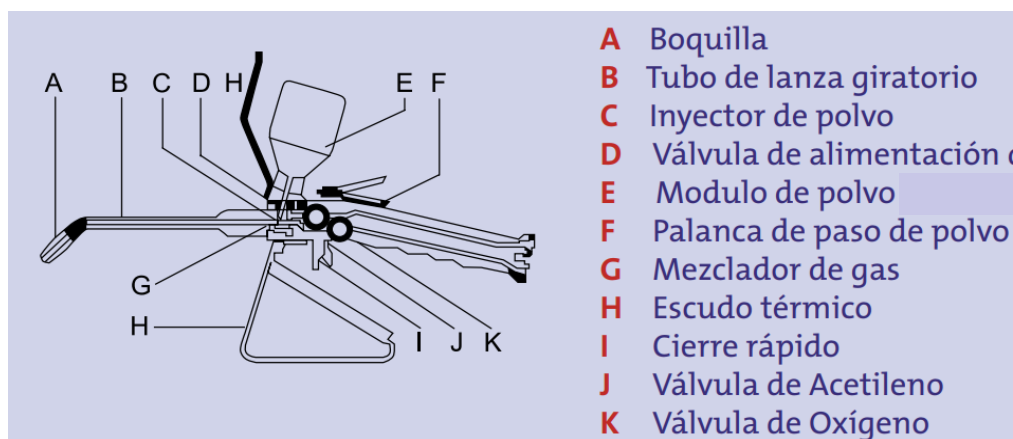


Figura 29: Esquema partes soplete.

El único control ajustable es la válvula utilizada para establecer el flujo de acetileno; otros controles son simples interruptores (on/off). Cuenta con una palanca de cierre rápido que ofrece una seguridad mejorada y permite a la antorcha encenderse nuevamente sin tener que tocar ningún otro control.

Datos técnicos:

Tasa de deposición	1 – 8 kg/h
Caudal de Oxígeno	500 – 2000 NI/h
Caudal de Acetileno	400 – 1800 NI/h
Presión de Oxígeno	4,0 bar
Presión de Acetileno	0,7 bar
Compressed air pressure	0 – 6 bar

Figura 30: Especificaciones técnicas CastoDyn DS 8000.

Este soplete requiere de un suministro de oxígeno y acetileno para generar la llama que transporta las partículas de material que caen por gravedad desde el depósito hasta el flujo de gas. Los valores de presión de gas son seleccionados en función del tipo de llama que se pretenda generar, en este caso, se trabaja con llama neutra. El equipo cuenta con dos boquillas distintas, una de ellas para proyección de aleaciones metálicas y otra para materiales cerámicos.



Figura 31: Montaje del soplete sobre un soporte en el laboratorio.

Permite proyectar una amplia gama de aleaciones que se funden y unen metalúrgicamente al sustrato utilizando la última tecnología de proyección. El fabricante asegura que aprobaciones independientes y extensivos ensayos de campo aseguran un nuevo standard de calidad en los campos del mantenimiento preventivo y aplicaciones de reparación.

El coste del soplete, que se tendrá en cuenta para el cálculo del presupuesto empleado, es de 1546,85€.

6.1.2.1 BOQUILLAS

Como se ha comentado, el modelo empleado para la proyección dispone de dos boquillas:

- Modelo A0S (ref. 61719191): la cual cuenta con un orificio de 30 mm de diámetro y se recomienda emplearla para la proyección de aleaciones metálicas.



Figura 32: Detalle boquilla A0S.

- Modelo A1S (ref. 61719192): en este caso el orificio es de 25 mm y ha sido diseñada para rociar materiales cerámicos.

6.1.3 GASES

Suponen un elemento fundamental dentro del proceso, ya que el ajuste de sus presiones determina la naturaleza de la llama producida (oxidante, neutra o reductora). En este caso se requiere una llama neutra y los parámetros requeridos para obtenerla son determinados por el fabricante en el escudo térmico del propio soplete:

O₂: 4.0 [bar]
C₂H₂: 0.7 [bar]
Air: 0-6 [bar]

Figura 33: Especificaciones presión gases.

Retomando la figura 31, se pueden observar dos orificios laterales, a través de los cuales salen el oxígeno y el acetileno, separados, y una serie de orificios centrales a través de los cuales sale el aire que transporta las partículas que caen desde el depósito a través de la válvula.

Por tanto, el aire transporta el material y lo impulsa hasta la salida del orificio de la boquilla donde, al entrar en contacto el acetileno con el oxígeno se produce una llama que funde el material, que es transportado por los gases hasta impactar el sustrato donde se adhiere formando *splats*.

Es importante remarcar que se requiere de la existencia de una instalación sometida a estrictas normas de seguridad que albergue estos gases y sea capaz de proporcionarlos a la presión deseada. A continuación, se muestra una imagen de los controles de dicha instalación:

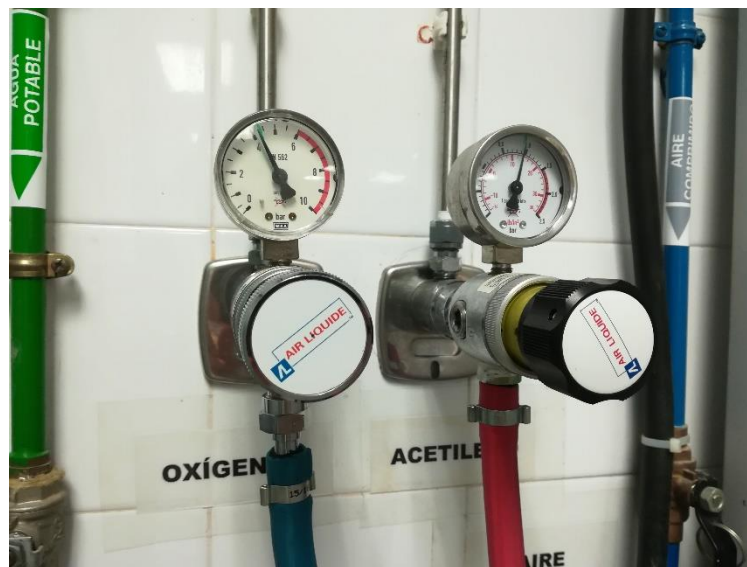


Figura 34: Instalación suministro y regulación de la presión de los gases.

Desde la fuente de suministro (bombonas), viajan hasta el soplete, previo paso por las válvulas de control, y en el disponen de tres orificios distintos de entrada, desde los cuales son conducidos por el interior del mismo hasta la salida de la boquilla donde se produce el proceso anteriormente detallado.

6.1.4 CABINA

Las distintas proyecciones son realizadas en una cabina de pintura como elemento de seguridad, ya que esta dispone de un flujo constante de agua que previene los daños que podrían causar las partículas a alta temperatura en caso de desprenderse en una dirección no deseada. Este elemento ha sido fabricado por EUROTEC INGENIEROS S.A.



Figura 35: Disposición del soplete sobre un soporte frente a la cabina con flujo de agua constante.

6.1.5 POLVOS

Tal y como se ha explicado en el apartado referente al desarrollo empírico del proceso, las aleaciones seleccionadas (todas ellas del fabricante Castolin Eutectic) fueron las siguientes:

6.1.5.1 28030 METACREAM

Se trata de una aleación multi-pulverizada de proyección en frío mediante procedimiento CASTODYN DS 8.000 para revestimientos de protección sobre aceros, sus aleaciones y otros materiales industriales. Sin deformaciones ni cambios en la estructura de base. Está especialmente diseñada para generar revestimientos con una estructura compacta, laminar y de con elevada fuerza de cohesión, resistentes al desgaste, a la abrasión y con buenas características de rozamiento.

En cuanto a las características técnicas, el fabricante proporciona los siguientes datos en la ficha técnica (disponible en los anexos):

Microdureza de las partículas de polvo:	1.600 HV _{10g}
Punto de fusión:	1.950° C
Densidad del producto:	4,0 g/cm ³
Color del producto:	Blanco
Color del depósito:	Gris oscuro
Norma:	DIN 32529: K 5-4
Temperatura de servicio máxima:	1.000 °C

Figura 36: Características específicas 28030 METACREAM.

Es comercializada en botes de 1,2 kg, cada uno de los cuales tiene un coste de 186,65 €, es decir, un coste de 155,54 €/kg.

6.1.5.2 ROTOTEC 51000

Aleación de alúmina titanio micropulverizada para ser proyectada como capa de enganche sobre aceros, aceros inoxidables, fundiciones, aluminio, níquel, aleaciones de níquel bronce, pero no con el cobre puro.

El fabricante recomienda los siguientes parámetros para una correcta proyección: Precalentamiento hasta 100°C con llama potente con exceso de acetileno; para las superficies de rotación establecer una velocidad de giro de entre 20 y 30 m/min; utilizar preferentemente el avance automático del carro: 5 a 10 mm por vuelta; y pre proyectar utilizando llama neutra, una única capa utilizando una distancia de proyección de 150 mm.

En este caso el coste de una unidad de 1,25 kg asciende a 499,85 €, lo que supone un coste de 399,88 €/kg.

6.1.5.3 EUTALLOY 10009

Es un polvo de aleación de base de níquel multicomponente (NiCrBSi) que se utiliza para producir depósitos de recubrimiento duros y de baja fricción para el control del desgaste o la corrosión. Esta aleación es una de las más empleadas en la industria de los recubrimientos.

El tamaño preciso de las partículas garantiza una deposición, fusión y dureza constantes. Es un polvo de proceso en caliente diseñado para aplicarse y fusionarse con los procesos de pulverización térmica Eutalloy o Ultrajet Eutalloy. Para aplicaciones en superficies de aceros, aceros inoxidables, fundiciones y aleaciones de base de níquel que están sujetas a abrasión, desgaste de metal a metal o, en algunos casos, corrosión.

Castolin Eutectic vende esta aleación en envases que contienen 0,7 kg y tienen un precio de 691,95 € (en el momento de su compra por parte de la universidad en 2014), o, lo que es lo mismo, un coste de 988,5 €/kg.

Magnetic Properties: This alloy contains enough Chromium, Boron, and Silicon to make it non-magnetic (ie Primarily Austenitic Structure).
Hall Flow Rate: 15 seconds
Bulk Density: 4.3 g/cc
Approximate Melting Range: Solidus, 1750°F (954°C)
Liquidus, 1950° F (1066°C)
Powder Coverage: 50 inch² per pound, 1/16" thick

Figura 37: Propiedades del polvo EUTALLOY 10009.

6.1.6 GRAFENO

Las características del grafeno empleado, como muestra la figura 37, son las siguientes: de 2 a 6 hojas (conocido como Multilayer), con una pureza superior al 99%, una longitud de 5 micrómetros y un grosor de 3 a 6 nanómetros, así como una superficie de 145 m²/g. En este caso el precio del recipiente que contiene 8 gramos es de ---- €.

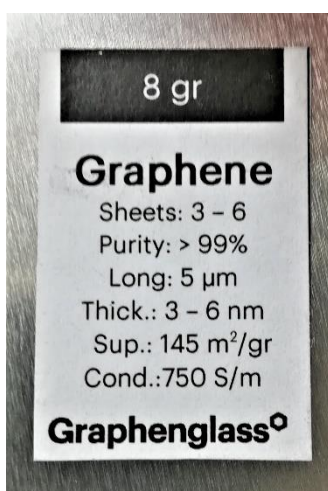


Figura 38: Especificaciones grafeno.

6.1.7 BÁSCULA DE PRECISIÓN

El dispositivo empleado fue una Mettler Toledo PB303. Cabe destacar que la precisión es de milésimas de gramo, la capacidad máxima establecida por el fabricante son 310 gramos y un tiempo de estabilización de 2 segundos.

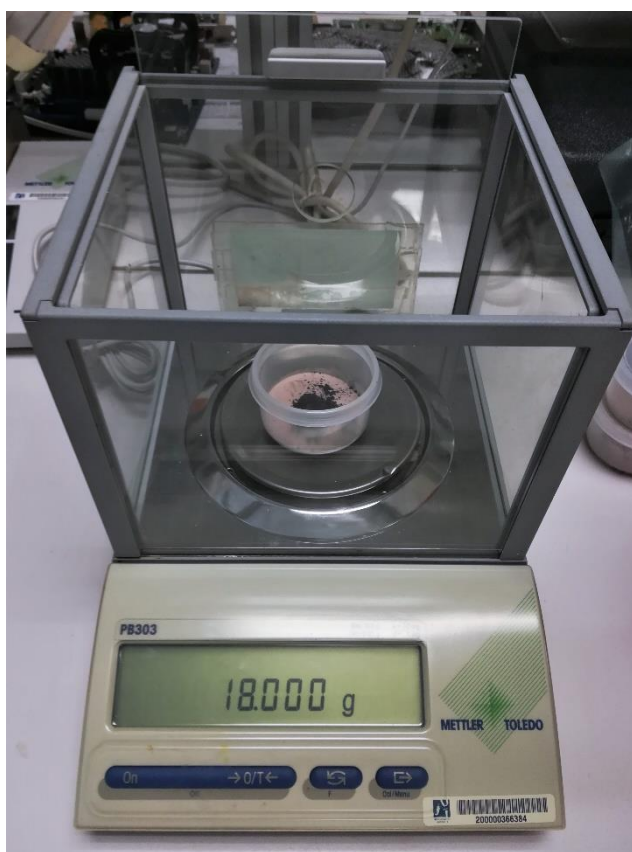


Figura 39: Mettler Toledo PB303 durante la preparación de una muestra.

6.1.8 RECIPIENTES

Para cada una de las proyecciones se ha empleado un recipiente plástico con cierre roscado o hermético para facilitar el proceso de pesado y el volcado del material al depósito del soplete.

6.1.9 MEZCLADOR DE RODILLOS

Máquina empleada para homogeneizar la mezcla de polvo comercial + aditivo (grafeno). Consta de un recipiente cerámico en el cual se introduce la mezcla que se va a proyectar dentro del recipiente anteriormente descrito.

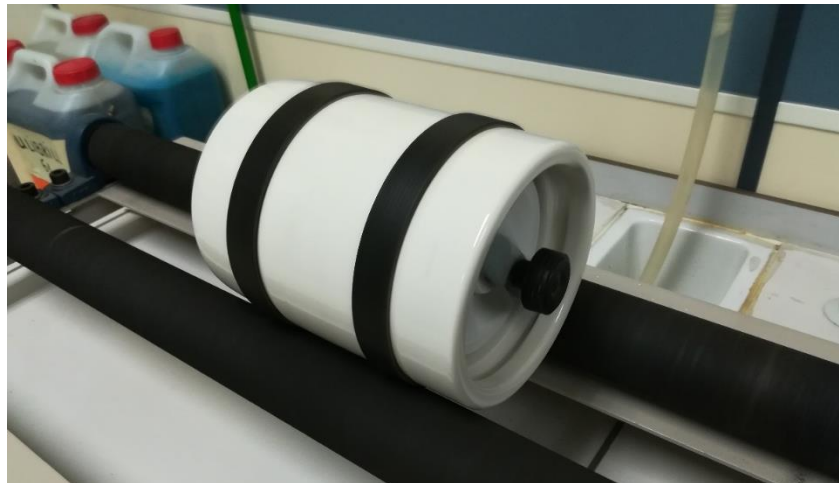


Figura 40: Mezclador de rodillos.

6.1.10 CALIBRE

Este instrumento, también conocido como pie de rey, ha sido necesario para determinar la longitud de los ejes de la huella del material proyectado.



Figura 41: Calibre digital.

6.1.11 VARILLA

Previamente al uso del mezclador de rodillos se mezclan los polvos que contienen aditivos de forma manual mediante este elemento.

6.1.12 CUCHARILLA

Herramienta empleada para añadir con precisión de miligramos el material a cada una de las dosis empleadas para generar las muestras.

6.1.13 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

Tanto por la elevada temperatura que alcanza el material proyectado como por el uso de materiales manométricos que pueden introducirse en el cuerpo humano con cierta facilidad y causar graves problemas de salud, es fundamental para el buen desarrollo de esta serie de experimentos usar las debidas protecciones.



Figura 42: Elementos de protección.

En todo momento se han empleado los dispositivos de seguridad pertinentes tales como guantes, gafas y mascarillas. Tanto para la manipulación de materiales como para realizar las proyecciones.

6.1.14 CÁMARA RÉFLEX

Mediante una cámara réflex Nikon D300 se obtienen imágenes con más de 10 millones de píxeles que permiten obtener una representación del perfil de los sólidos en un tamaño suficiente como para ser analizado con precisión. Se utiliza un objetivo NIKKOR AF-S DX de 18-55 mm f/3,5-5,6 VR.



Figura 43: Nikon D300.

Remarcar que se emplea en un modo que permite enfocar objetos cercanos y con un elevado contraste. Permite obtener una imagen en la que se distingue claramente el volumen del material depositado sobre el sustrato.

6.2 SOFTWARE

En este apartado se describen los programas informáticos implicados en el proceso de transformación de las muestras físicas en digitales, así como en la extracción, visualización y tratado de los datos. Además, destacar que se presentan en el mismo orden que son necesarios durante el desarrollo empírico que en este documento ha sido descrito:

6.2.1 PHOTOSHOP

Adobe Photoshop es un editor de gráficos rasterizados desarrollado por Adobe Systems Incorporated líder mundial del mercado de las aplicaciones de edición de imágenes. Usado principalmente para el retoque de fotografías y gráficos. Se ha empleado para convertir las imágenes tomadas por la cámara réflex anteriormente presentada en gráficos bicolor con elevado contraste para facilitar el reconocimiento de la imagen por el software que a continuación se presenta, MATLAB.

6.2.2 EXCEL

Aplicación de hojas de cálculo que forma parte de la suite de oficina Microsoft Office. Es una aplicación utilizada en tareas financieras y contables, con fórmulas, gráficos y un lenguaje de programación.

En este caso se ha empleado para comparar datos empíricos con sus correspondientes teóricos con la finalidad de comprobar la validez de ciertas hipótesis.

6.2.3 MATLAB

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. Además, se pueden ampliar las

capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink (herramienta adicional) con los paquetes de bloques (blocksets).

6.2.3.1 IMAGE PROCESSING TOOLBOX

Image Processing Toolbox™ proporciona un conjunto completo de algoritmos estándar de referencia y apps de flujo de trabajo para el procesamiento, el análisis y la visualización de imágenes, así como para el desarrollo de algoritmos. Puede llevar a cabo segmentación de imágenes, mejora de imágenes, reducción de ruido, transformaciones geométricas, registro de imágenes y procesamiento de imágenes 3D.

imread

Purpose

Read images from graphics files

Syntax

```
A = imread(filename,fmt)
[X,map] = imread(filename,fmt)
[...] = imread(filename)
[...] = imread(...,idx)    (TIFF only)
[...] = imread(...,ref)    (HDF only)
[...] = imread(...,'BackgroundColor',BG) (PNG only)
[A,map,alpha] = imread(...) (PNG only)
```

Description

`A = imread(filename,fmt)` reads a grayscale or truecolor image named `filename` into `A`. If the file contains a grayscale intensity image, `A` is a two-dimensional array. If the file contains a truecolor (RGB) image, `A` is a three-dimensional (m-by-n-by-3) array.

`[X,map] = imread(filename,fmt)` reads the indexed image in `filename` into `X` and its associated colormap into `map`. The colormap values are rescaled to the range [0,1]. `A` and `map` are two-dimensional arrays.

`[...] = imread(filename)` attempts to infer the format of the file from its content.

`filename` is a string that specifies the name of the graphics file, and `fmt` is a string that specifies the format of the file. If the file is not in the current directory or in a directory in the MATLAB path, specify the full pathname for a location on your system. If `imread` cannot find a file named `filename`, it looks for a file named `filename.fmt`. If you do not specify a string for `fmt`, the toolbox will try to discern the format of the file by checking the file header.

Figura 44: Ejemplo función lectura imágenes MATLAB.

Las apps de Image Processing Toolbox le permiten automatizar los flujos de trabajo habituales de procesamiento de imágenes. Puede segmentar datos de imagen, comparar técnicas de registro de imágenes y procesar por lotes conjuntos de datos extensos de forma interactiva. Las apps y las funciones de visualización le permiten explorar imágenes, volúmenes 3D y vídeos, ajustar el contraste, crear histogramas y manipular regiones de interés.

7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

7.1 DISTRIBUCIÓN DE MASA

Una vez expuestos todos los experimentos realizados para la obtención de muestras, se procede a explicar cómo se han extraído datos de estas y de qué manera han sido tratados para obtener conclusiones.

El primer reto al que nos enfrentamos consiste en constatar que las muestras generadas cumplen los fundamentos teóricos analizados en los artículos de investigación. Especialmente, uno de los procedimientos clave en este estudio es verificar que las proyecciones puntuales guardan una clara relación con la función gaussiana. Para ello es fundamental desarrollar un procedimiento empírico que permita obtener la desviación típica que presenta la muestra (suponiendo que esta hipótesis es válida).

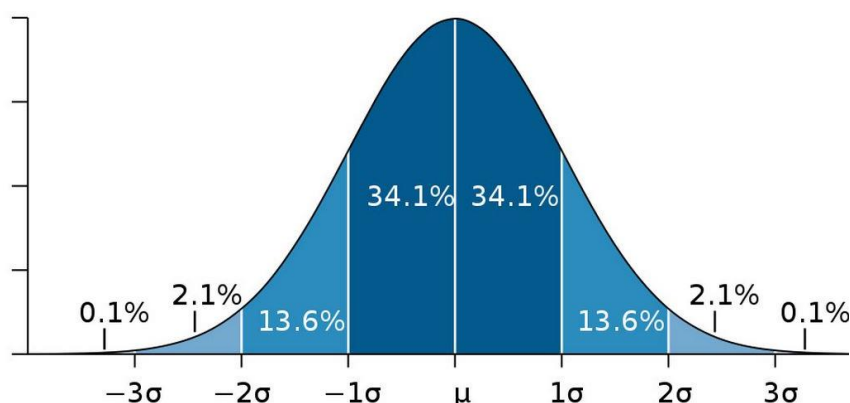


Figura 45: Distribución normal.

Por tanto, se requiere un método que permita convertir el volumen generado durante una deposición puntual en una gráfica como la de la figura 40.

En un primer momento se valoró la posibilidad de usar un tipo de tecnología disponible en la universidad que permite contar de forma precisa un sólido para luego proyectarlo de forma similar a como un proyector lo hace con una imagen sobre una gran pantalla. Mediante este método se podía obtener de forma ampliada una imagen fiel de la sección del sólido estudiado. Sin embargo, este planteamiento fue descartado por dos motivos principalmente: existe un alto riesgo de fractura/pérdida de adherencia del volumen generado durante el corte (además de la posibilidad de generar cambios en su estructura), y solo permite analizar una sección, es decir, si se realiza un corte perpendicular al sustrato por el centro del volumen en una dirección determinada (en la figura 42, paralelo al eje X, representado por el eje amarillo, por ejemplo), no se puede realizar un nuevo corte para analizar la sección perpendicular a la primera (representado por el eje rojo en la figura 42).

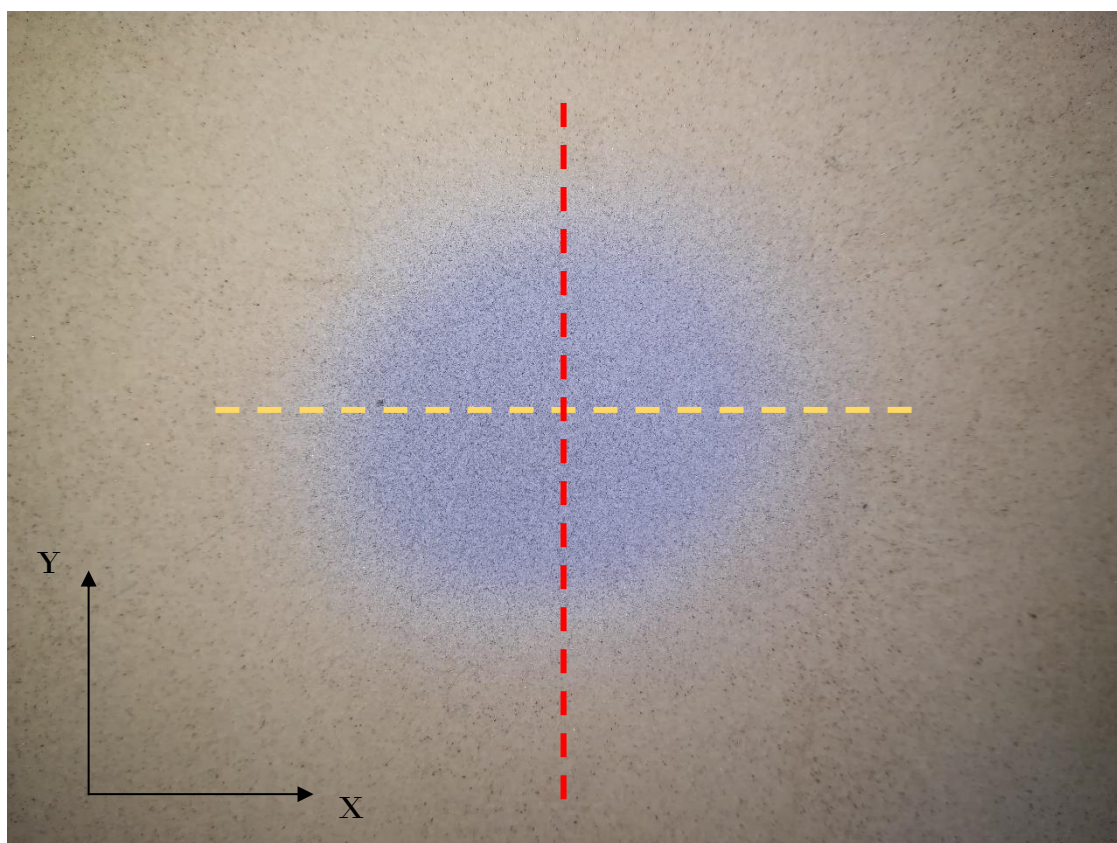


Figura 46: Esquema secciones muestra.

La importancia de conseguir el perfil en ambas secciones se debe a que teóricamente, este volumen sigue una distribución gaussiana regida por dos desviaciones típicas, una para cada eje: σ_x , σ_y . Por tanto, queda descartada la idea de cortar la pieza.

Una v.a. bidimensional (X, Y) se dice que sigue una distribución Normal Bidimensional, si su función de densidad conjunta, definida en \mathbb{R}^2 , es de la forma

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_X\sigma_Y\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X} \right) \left(\frac{y-\mu_Y}{\sigma_Y} \right) + \left(\frac{y-\mu_Y}{\sigma_Y} \right)^2 \right] \right\}$$

siendo

$$\mu_X = E[X] \quad \sigma_X^2 = \text{Var}(X)$$

$$\mu_Y = E[Y] \quad \sigma_Y^2 = \text{Var}(Y)$$

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)}\sqrt{\text{Var}(Y)}} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X\sigma_Y} \quad \text{Coeficiente de correlación lineal de } (X, Y)$$

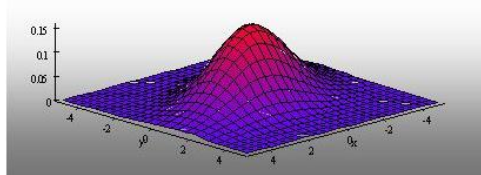


Figura 47: Ecuación distribución normal bidimensional.

La alternativa que se plantea para evitar cortar las muestras es realizar fotografías de gran resolución de las mismas desde un plano perpendicular y cercano al sustrato. De esta forma es posible obtener multitud de perfiles alrededor del sólido. Se opta por obtener 4 imágenes (como las que se muestran en la figura 4) de una misma muestra para comprobar la desviación típica a lo largo de cada eje desde puntos de vista opuestos.

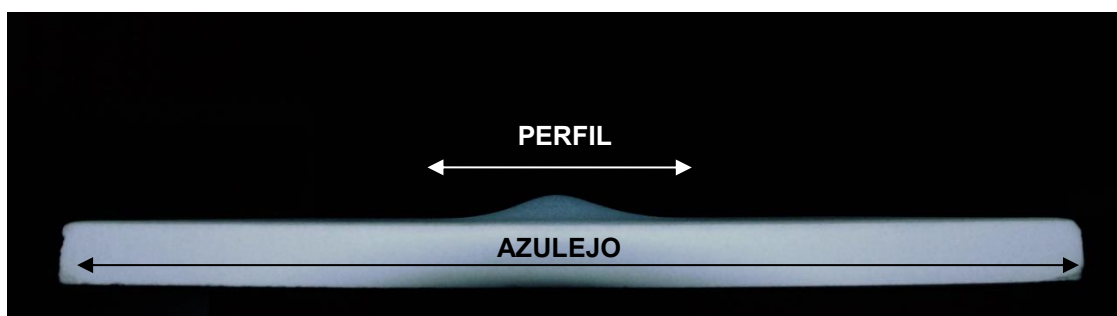


Figura 48: Imagen obtenida mediante este método.

Una vez se dispone de un método de extraer el perfil del sólido generado mediante proyección térmica se debe diseñar una forma de extraer del documento gráfico la correlación con una distribución gaussiana. Para ello se debe averiguar cuál es la desviación típica de la muestra, dado que la media puede ser considerada nula imponiendo el origen del sistema de coordenadas a conveniencia para simplificar los cálculos.

En un primer momento, con la simple intención de validar que se trata de una distribución de tal tipo, se extraen de forma manual todos los puntos de la superficie del recubrimiento para asemejarlo con la curva de distribución normal. Para ello, mediante tratamiento con el software fotográfico anteriormente presentado, se extrae el perfil de la imagen tomada y ampliada y se superpone sobre la imagen de un papel milimetrado, de tal forma que, a pesar de que se distorsionan las medidas de la muestra se mantiene la proporcionalidad entre las medidas del eje X e Y y se pueden extraer hasta cerca de 300 puntos.

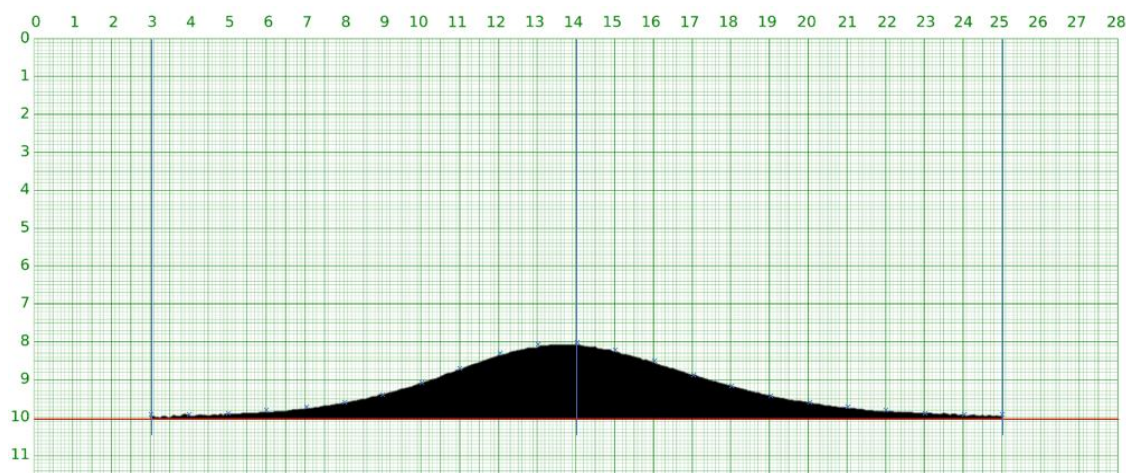


Figura 49: Perfil sobre papel milimetrado.

Una vez hemos transformado el volumen generado experimentalmente en una serie de pares de puntos se procede a tratarlos como si de una distribución normal se tratase y se extrae, primeramente, la frecuencia relativa y en segundo lugar la frecuencia relativa (todos los cálculos pertinentes serán detallados en apartados posteriores). Lo cual nos permite relacionar medidas de longitud con medidas de probabilidad tal como muestra la figura 42. De este modo, se busca la coordenada del eje x que se corresponde con el 99,73% de la altura acumulada.

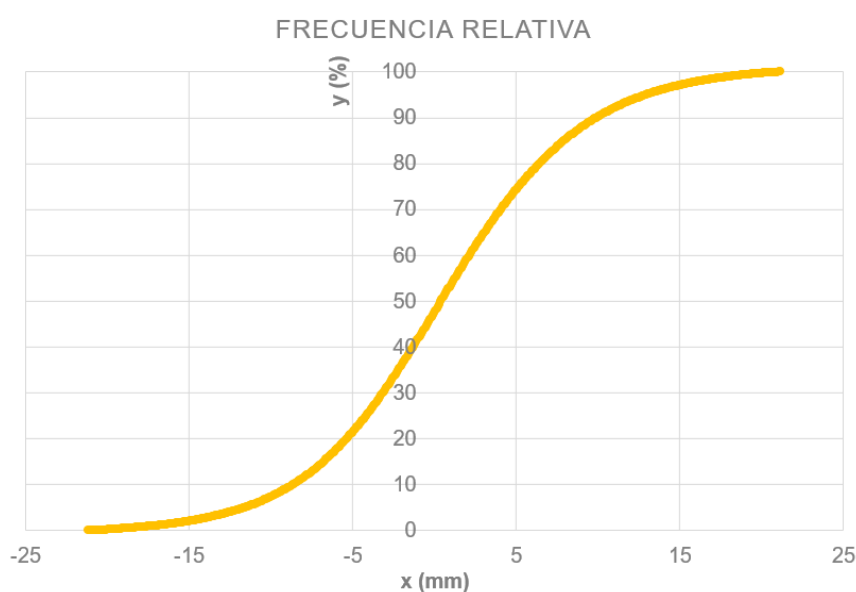


Figura 50: Frecuencia relativa asociada a los puntos de una muestra.

Una vez obtenemos el valor de 3 sigma (la media es nula), es decir, la desviación típica multiplicada por tres que se corresponde con este valor del 99,73%, simplemente dividiendo entre seis obtenemos el valor de la desviación típica. Con este valor, mediante la función *DISTR.NORM(valor x; media; desviación típica)* se obtiene la función correspondiente al perfil de alturas del sólido en cuestión en caso de seguir una distribución normal perfecta. En el apartado de resultados se cuantificará el error entre ambas, pero a continuación se muestran ambas gráficamente:

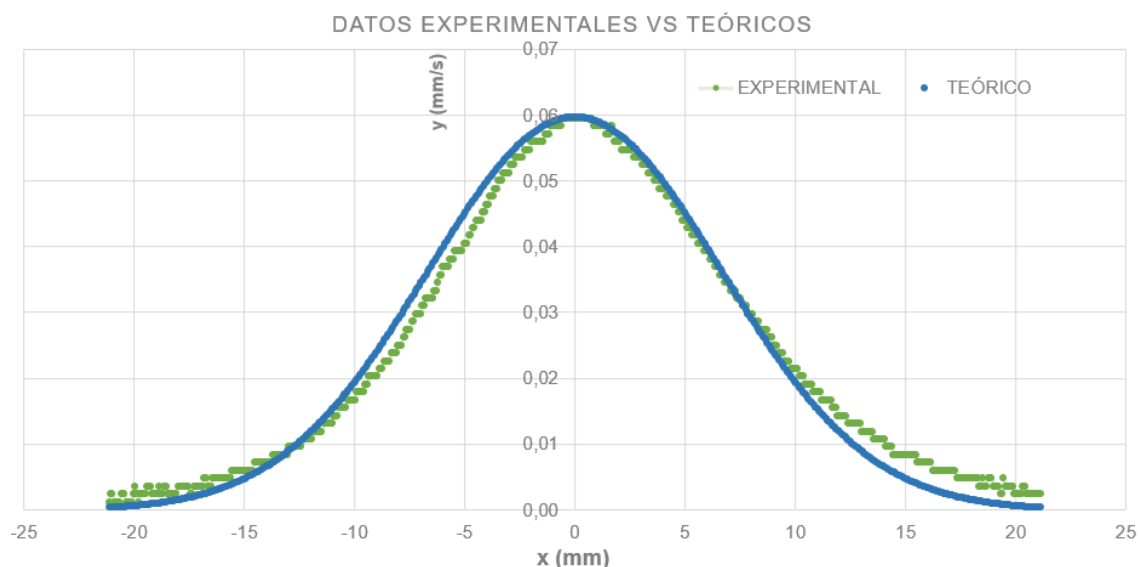


Figura 51: Comparativa entre el perfil experimental (verde) y el teórico (azul).

Tras comprobar que el método de extracción de la desviación típica es válido, se debe replicar este de forma que se pueda automatizar. Ya que, recordemos que la finalidad es crear una herramienta que sea fácilmente llevable a la práctica.

La solución que se plantea para ello es, de nuevo trabajar con una foto del perfil pero en este caso el reconocimiento de los puntos superficiales y su conversión en coordenadas se lleva a cabo empleando el “toolbox” del software MATLAB específicamente diseñado para reconocimiento de imágenes.

Mediante la función “imread” se convierte la imagen en formato .jpg o –jpeg en una matriz de tantos elementos como píxeles conforman dicha fotografía. A cada uno de estos elementos se le asocia un vector triple con las coordenadas de su posición (debidamente posicionado en el sistema de referencia seleccionado) así como un tercer elemento conformado por el código de color, de tal forma que se asocia a cada píxel: coordenada x, coordenada y y color. Por tanto, si el archivo contiene una imagen a color, es un array m-by-n-by-3.

Se establece un criterio de reconocimiento de cambio de color (recordemos que son imágenes tratadas en las que el perfil del volumen aparece en color azul frente a un fondo negro, como mostraban las figuras 21 y 26) basado en el código de color. Se calcula la media de esos tres valores que definen el color y se establece un umbral a partir del cual diferencia azul de negro (este umbral es ajustable y varía en algunos casos para conseguir una representación precisa).

Además, dado que se trabaja en unidades de píxeles, se requiere una conversión a unidades de longitud. Para ello cualquier muestra que se analice debe ser medida para aplicar un factor corrector.

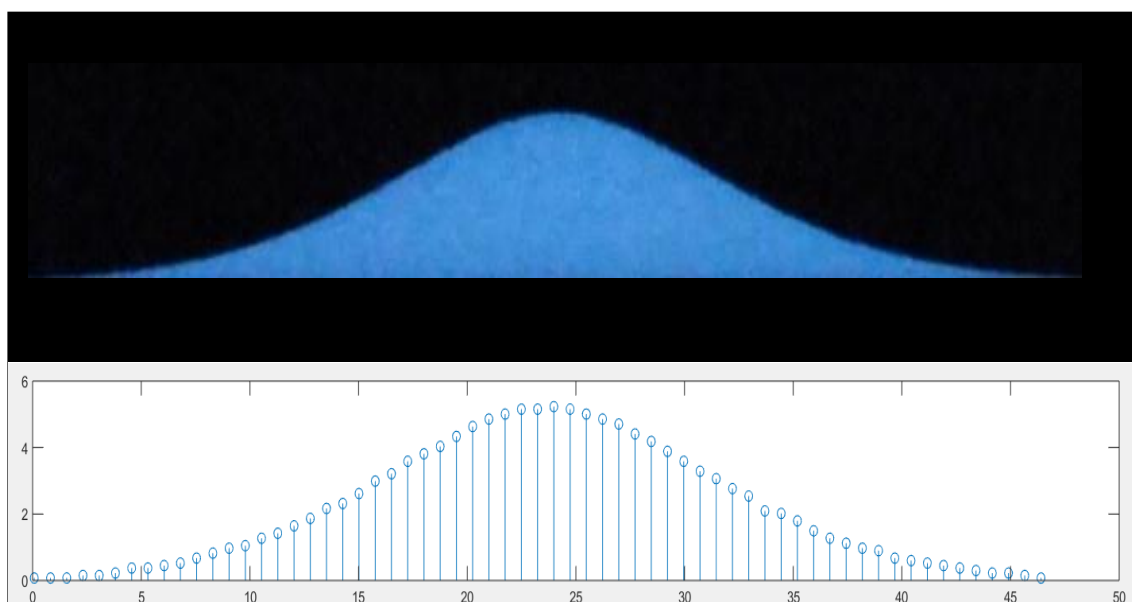


Figura 52: Fotografía y gráfica extraída mediante reconocimiento de imagen de un mismo perfil.

Por tanto, se ha conseguido desarrollar una metodología relativamente sencilla que permite modelizar la distribución de masa, es decir, determinar la desviación típica, para un proceso de proyección térmica específico, sea cual sea el tipo de proyección empleado, la boquilla empleada, el gas que transporta las partículas, el tamaño de estas, el tipo de sustrato, la distancia de proyección, etc.

De forma paralela se ha analizado la tasa de deposición de los distintos materiales proyectados sobre un mismo sustrato y la variación de la misma con el uso de aditivos.

7.2 OPTIMIZACIÓN

La intención del presente estudio es caracterizar la distribución de masa de las proyecciones térmicas pero con la intención de sentar las bases de para una futura optimización del proceso. En este caso se requieren cálculos de elevada complejidad cuando se trata de superficies con formas irregulares. Sin embargo, para demostrar la validez del planteamiento, se testa, con la distribución de masa obtenida mediante el método explicado, la optimización de la cantidad de material requerida para recubrir una superficie de forma cuadrangular dado un grosor objetivo y una tolerancia asociada.

Para este caso, se emplea un azulejo de las mismas características que los empleados como sustratos en las proyecciones puntuales. Para demostrar la validez del planteamiento y su desarrollo, se compara la cantidad de masa que se ha requerido en uno de los ensayos “de trayectoria” con la cantidad teórica que se calcula es necesaria para conseguir un determinado grosor de recubrimiento bajo ciertas condiciones de tolerancia. Estas condiciones hacen referencia a la diferencia entre la altura de los picos de cada pasada y los valles. Los picos se dan en los segmentos sobre los cuales se desplaza el soplete y los valles en los puntos intermedios entre estos, es decir, el pico se corresponde con el punto más alto de la

campana de Gauss y, el valle, con el punto en que una distribución se solapa con otra.

A continuación, se muestra un esquema para ver claramente a qué hacen referencia los conceptos de pico y valle. Cabe destacar que es una imagen meramente explicativa y las dimensiones no se corresponden con ninguna proyección real:

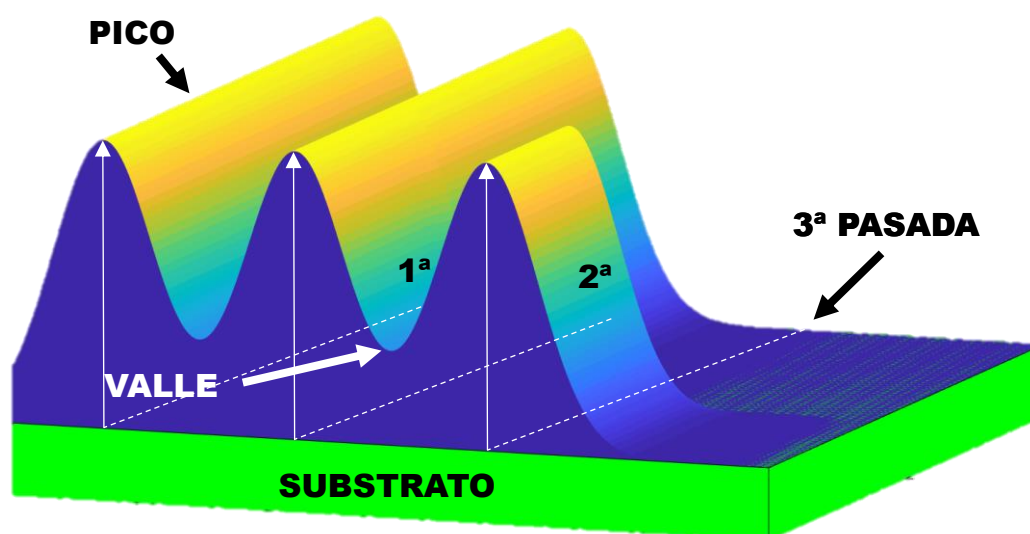


Figura 53: Esquema explicativo conceptos pico y valle.

Los ensayos puntuales presentados anteriormente han permitido conocer la distribución teórica e idealizada de las partículas sobre el sustrato. En base a esta y aplicando unas ciertas condiciones: relación entre el grosor en los valles y en los picos, espesor de revestimiento en los extremos del sustrato, separación entre pasadas...se habilita el cálculo de en mínimo número de pasadas, y, por tanto, mínima cantidad de material requerida, que cumplen las condiciones previamente establecidas. De esta manera, se puede decir que se establece una metodología para la minimización de los costes, frente a la habitual proyección “a ojo” empleada en la industria (cuya presencia se corroboró, como se ha expuesto anteriormente, en

empresas con presencia internacional y líderes en el sector, como Castolin Eutectic).

Es importante volver a remarcar que esta no es la finalidad última del proyecto, sino que simplemente se pretende aplicar a un caso sencillo: reproducir una proyección experimental realizada y comparar los requerimientos de cantidad de material para así comprobar la efectividad del método en cuanto a ahorro de costes; y que, por tanto, abre las puertas al desarrollo de una aplicación práctica que permita a los técnicos del sector encargados de las proyecciones, en poco tiempo, simplemente realizando una proyección de muestra, una fotografía e indicando la geometría del sustrato, obtener las directrices de la trayectoria a seguir durante la proyección del material para optimizar el uso de material.

8. RESULTADOS FINALES

Siguiendo el razonamiento planteado en el apartado de análisis de soluciones y mediante los distintos cálculos y código que se adjuntas en los anexos, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

8.1 ANÁLISIS GRÁFICO PROYECCIÓN

En primer lugar, para corroborar que las muestras generadas en el laboratorio siguen una distribución normal, tal como se preveía en los distintos artículos de investigación citados anteriormente, se comprueba que el error entre la curva gaussiana de media cero y desviación típica calculada a partir de los datos experimentales, se aproxima al perfil obtenido de forma experimental.

El error relativo entre los puntos de ambas curvas es del **8,74%**, por lo que se considera válida la prueba.

8.2 COMPARATIVA EXPERIMENTALES - TEÓRICOS

A partir de los datos experimentales de la tabla ____ (presentada en el anexo referente a datos) se comparan con los resultados arrojados por el código que se adjunta en el mismo anexo. Siguiendo la fórmula del error relativo entre masas que también se presenta en los anexos, los resultados se muestran en la siguiente tabla, en la cual se puede observar que dicho error en ningún caso supera el 5%, por lo que se puede afirmar que el método es muy preciso:

nº	MATERIAL	CANT. (g)	GRAF. (g)	MASA DEP. (g)	DESV. TÍP. (mm)	DENS. (g/cm ³)	VOL. (mm ³)	MASA (g)	ERROR (%)
1	Al ₂ O ₃ -TiO ₂	18,000	0,000	0,734	7,225	4,03	187,888	0,751	2,32
2	Al ₂ O ₃ -TiO ₂	17,946	0,054	1,641	7,525	4,02	403,714	1,623	1,10
3	Al ₂ O ₃ -TiO ₂	17,820	0,180	2,953	6,399	3,99	769,175	3,069	3,93
7	NiCrBSi	18,000	0,000	5,588	8,558	45,50	122,815	5,576	0,21
8	NiCrBSi	17,946	0,054	6,410	8,446	45,36	146,808	6,665	3,98
9	NiCrBSi	17,820	0,180	5,485	9,044	44,91	124,999	5,610	2,28

Tabla 1: Errores relativos entre las masas reales y las teóricas.

En las muestras 4,5 y 6, realizadas con la aleación de base níquel, que a priori, tras la proyección parecían válidas, se ha observado que el enfriamiento del material tras la proyección ha introducido unas tensiones que modifican el volumen proyectado. Esto ha provocado que se alcance errores sustancialmente superiores a los anteriormente presentados (7,43%, 12,69% y 21,13%, respectivamente). Se considera que dichos errores tan elevados son debidos a las irregularidades que se muestran en las siguientes imágenes, por lo que no serán tenidos en cuenta para verificar la validez del método planteado:

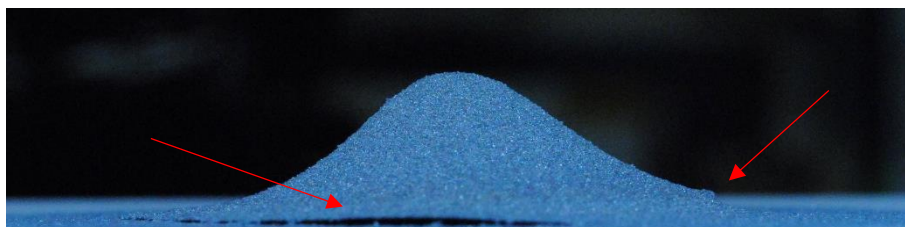


Figura 53: Muestra de la proyección puntual de 18 gramos de aleación Ni-Al.

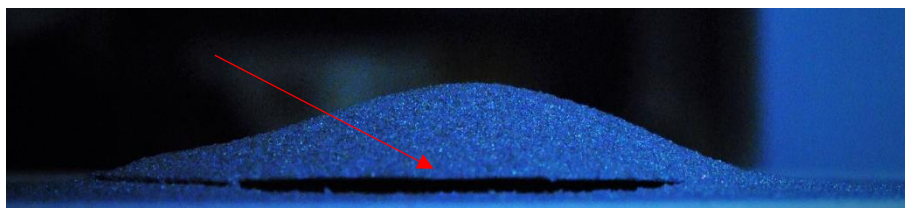


Figura 54: Detalle de las irregularidades en la muestra generada con Ni-Al y un 0,3% de grafeno.

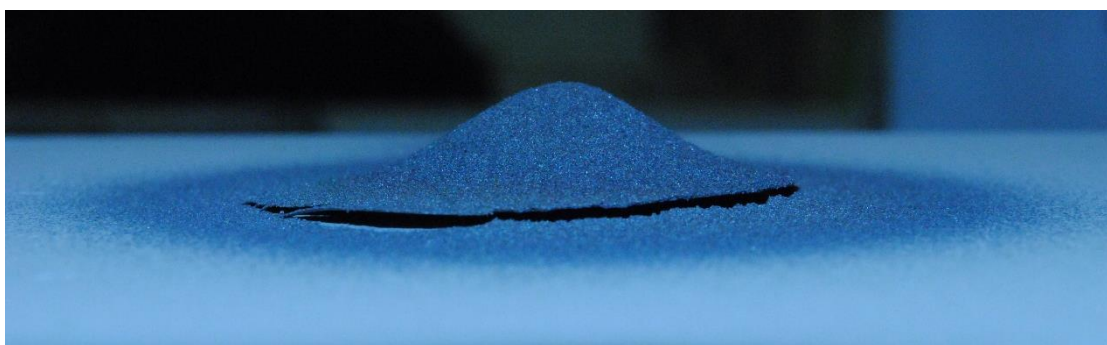


Figura 55: Muestra proyección Ni-Al + 1% grafeno.

Demás, respecto a la proyección de la aleación de base níquel, cabe destacar que se han obtenido buenos resultados en cuanto a la tasa de deposición, ya que en este caso ronda el 50%. Sin embargo, se ha detectado una clara tendencia negativa de esta conforme se añade grafeno.

En los demás casos, no se ha notado una influencia notable de la cantidad de grafeno sobre la tasa de deposición del NiCrBSi, pero sí un incremento significativo de esta para el caso del material cerámico, la alúmina titanio (todos porcentajes obtenidos se muestran en el anexo 1.1).

Para las muestras que sí se han considerado válidas, se ha desarrollado un código que además de arrojar los valores teóricos del área de la desviación estándar de este, el volumen teórico de la muestra analizada y su la masa teórica

correspondiente, presenta una gráfica comparativa entre la gráfica teórica (rojo) y los resultados experimentales procedentes de una fotografía:

▪ **MUESTRA nº1** (criterio color: 35; eje: 46,07mm):

- La desviación estándar es: 7,22513 mm.
- Volumen: 186,372 mm³.
- Masa: 0,751081 g.

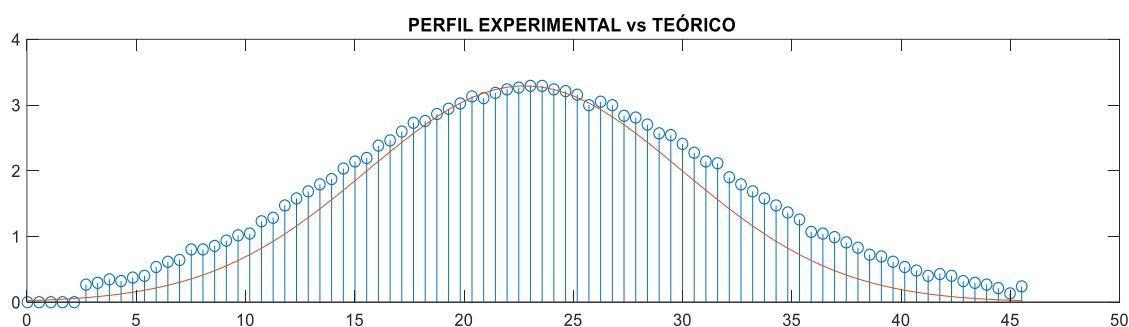


Figura 56: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 1 (medidas en milímetros).

▪ **MUESTRA nº2** (15; 52,16mm)

- La desviación estándar es: 7,5255 mm.
- Volumen: 403,714 mm³.
- Masa: 1,62293 g.

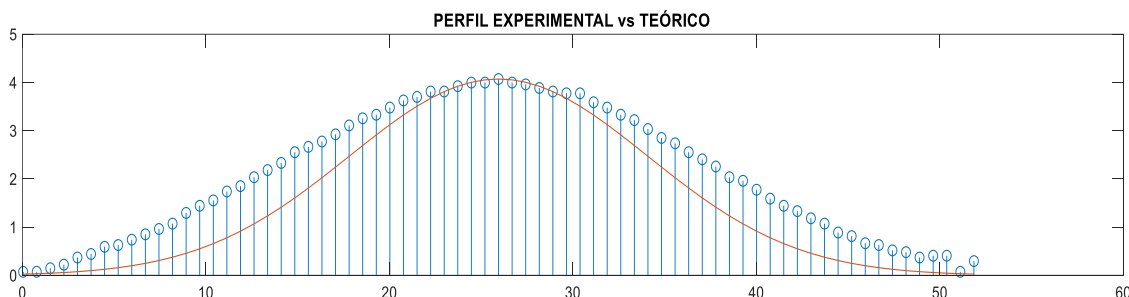


Figura 57: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 2 (medidas en milímetros).

- **MUESTRA nº3** (50; 46,23 mm)
 - La desviación estándar es: 6,39905 mm.
 - Volumen: 769,175 mm³.
 - Masa: 3,06901 g.

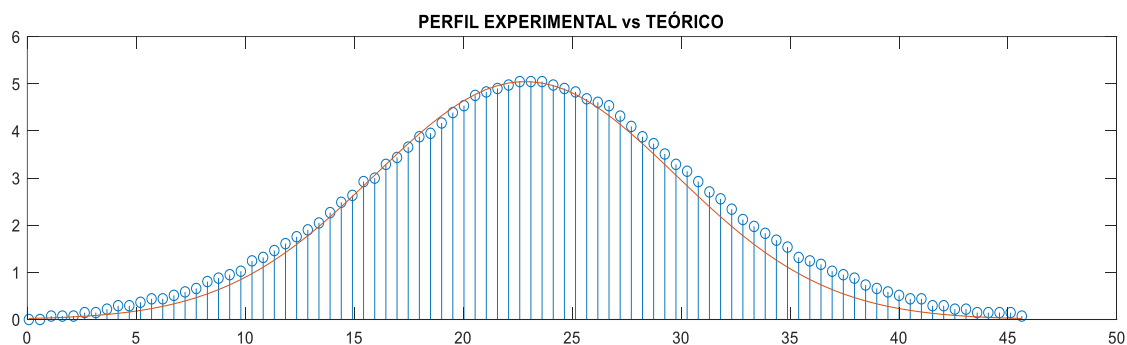


Figura 58: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 3 (medidas en milímetros).

- **MUESTRA nº7** (30, 52,96mm)
 - La desviación estándar es: 8,55825 mm.
 - Volumen: 122,815 mm³.
 - Masa: 5,57579 g.

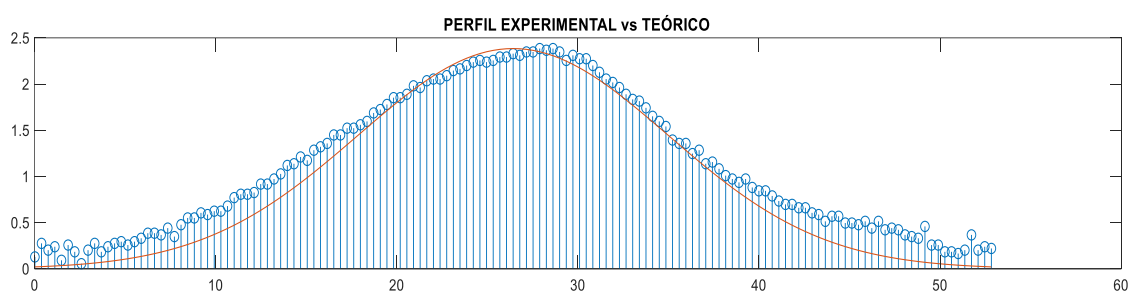


Figura 59: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 7 (medidas en milímetros).

- **MUESTRA nº8** (23; 53,47 mm)
 - La desviación estándar es: 8.44596 mm.
 - Volumen en mm es: 146.808 mm³.
 - Masa en g es: 6.6651 g.

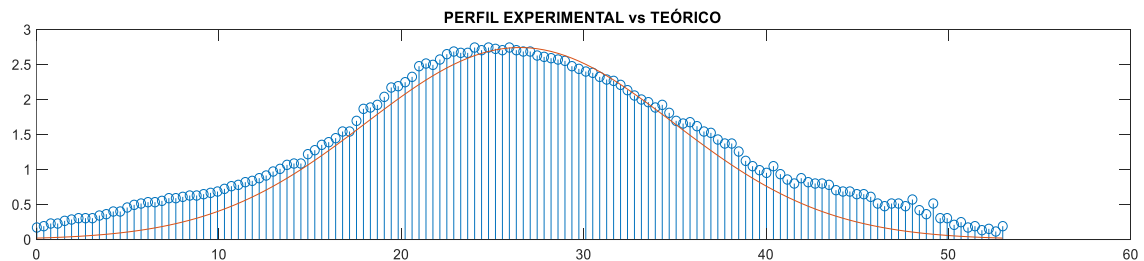


Figura 60: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 8 (medidas en milímetros).

- **MUESTRA nº9** (17; 55,74mm)
 - La desviación estándar es: 9.04417 mm.
 - Volumen: 124.999 mm³.
 - Masa: 5.61245 g.
 -

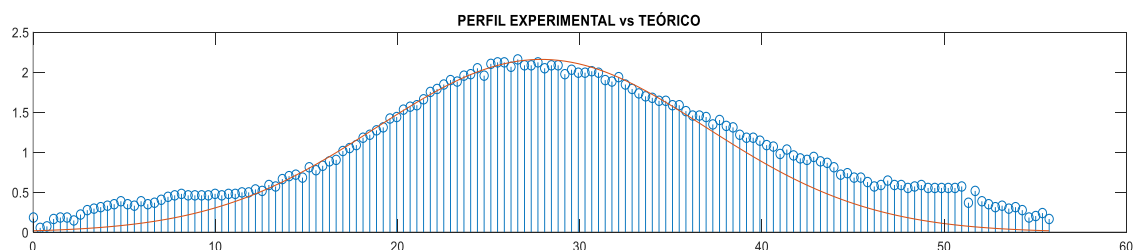


Figura 61: Perfil experimental (azul) frente al teórico (rojo). Muestra nº 9 (medidas en milímetros).

8.3 OPTIMIZACIÓN

Una vez conocida la forma en que, para un determinado material, método de proyección térmica, material de sustrato, etc. se conoce cómo se distribuyen las partículas de masa o *splats* sobre este último, es posible determinar la trayectoria que debe seguir el soplete durante la proyección para minimizar la cantidad de material empleada y, en consecuencia, los costes que suponen la generación del revestimiento en cuestión. Para ello se deben preestablecer ciertas condiciones, tal y como se ha explicado en el apartado 7.2.

Además de estas condiciones, para realizar una comparativa entre los resultados experimentales y los teóricos, se han medido las variables características de cada pulverizado experimental: cantidad de material empleada, cantidad adherida, tiempo total de proyección, tiempo en que se proyecta total o parcialmente fuera del sustrato...

De este modo, el modelo teórico es caracterizado por los mismos valores, para simular con la mayor precisión posible el proceso.

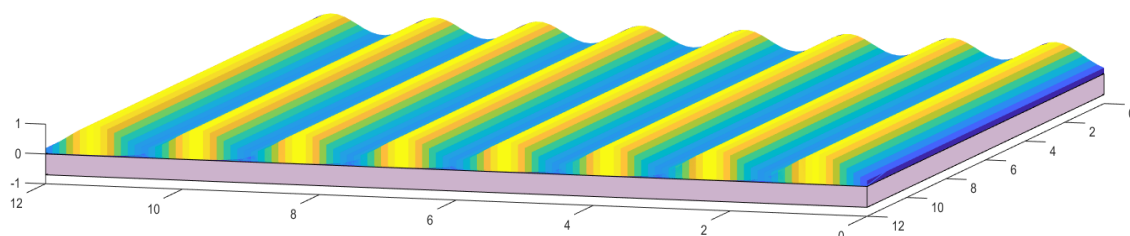


Figura 62: Simulación revestimiento completo azulejo (para una desviación típica y unas condiciones de optimización determinadas).

8.3.1 DATOS EXPERIMENTALES

Se realizaron 5 proyecciones completas de azulejos, de las cuales, debido a la naturaleza manual del procedimiento, se han considerado válidas 3 (durante el desarrollo de las otras dos se observó, en una de ellas, problemas en cuanto a

la fluidez del material a lo largo de la estructura interna del soplete, y, en la otra se dio un fallo debido a un problema referente a la fijación del sustrato).

De este modo, se considera que tres muestras son suficientes para contrastar la validez del método planteado. Los resultados y características de las mismas se muestran a continuación:

		Proyección 1	Proyección 2	Proyección 3
Material		Alúmina Titanio	Níquel Aluminio	Alúmina Titanio
Aditivo		1% Grafeno	-	1% Grafeno
Azulejo		nº 8	nº11	nº 21
Masa polvo	Inicial	50,000	50,000	22,962
	Final	22,962	47,785	20,289
Masa azulejo	Inicial	217,013	212,596	219,966
	Final	220,446	213,043	220,027
Masa empleada		27,038	2,215	2,673
Masa adherida		3,433	0,447	0,061
% masa adherida		12,70	20,18	2,28
Tiempo total		116	12,700	15,510
Tiempo sin material		8,3	2,000	3,200
t (s)		107,7	10,7	12,31
M (g/s)		0,251	0,207	0,217
Tpr sustrato	Dentro	83	8,300	9,930
	Extremos	25,7	2,400	2,380
Pasadas trayectoria equivalente		11,689	12,375	14,517
Pasadas trayectoria aproximada		12	12	15

Tabla 2: Resultados de ensayos de trayectoria.



Figura 63: Fotografía proyección Pr 1.

8.3.2 RESULTADOS TEÓRICOS

Dado que las desviaciones típicas asociadas al método de proyección empleado y los materiales pulverizados en cada caso son conocidas, se puede calcular la masa requerida para generar un recubrimiento del mismo tipo, pero optimizando la trayectoria.

Para simular el resultado experimental se debe de tomar alguna de las variables como referencia y optimizar el resto. Este procedimiento depende de los intereses en cada caso.

Conocida la masa adherida y la superficie del sustrato (cada azulejo tiene un área de $151,29 \text{ mm}^2$), se puede calcular el grosor medio del recubrimiento. Se procede a calcular, bajo unas condiciones de tolerancia que para este caso pueden ser fijadas por la relación altura valle igual a un cierto porcentaje de la

altura pico, siendo el valor experimental de grosor medio la media entre la altura del pico y la del valle (recordemos que existen multitud de planteamientos para lograr minimizar el uso de material, simplemente se toma este como referencia).

Para el caso de la primera proyección (Pr 1), se conoce, gracias al estudio previo, que el valor de la desviación típica es 6,4 mm; la cantidad de material que se adhirió al sustrato: 3,433 g, y, por tanto, el grosor medio fue de (densidad: 3,9915 g/cm³) 57 micrómetros.

En este caso, la masa requerida según el algoritmo desarrollado, es de 3,24 g. A priori, puede parecer que la mejora es insignificante, pero hay que recordar que esta masa se proyecta toda dentro del sustrato, ya que las pérdidas en los extremos ya han sido consideradas. La tasa de deposición cuando se proyecta dentro del sustrato es conocida (la correspondiente al ensayo puntual), por tanto, dividiendo la masa que teóricamente se deposita entre este porcentaje, se obtiene la cantidad total de material requerida, que una vez comparada con la masa total empleada experimentalmente, nos da el porcentaje de ahorro en material, y, por tanto, en costes.

```
Masa adherida: 3.23978 g.
Masa perdida en los extremos: 0.250106 g.
Masa total requerida: 20.0049 g.
Se consigue un ahorro en material del 26.0174 por ciento.
El número de pasadas debe de ser: 8 .
Distancia entre la primera y el extremo del sustrato: 1.63429 mm.
Distancia entre pasadas sucesivas: 11.44 mm.
```

Figura 64: Extracto de los resultados teóricos para la proyección Pr 1.

A continuación, se muestra la representación gráfica de la solución optimizada. En ella se muestran en amarillo los picos, y las zonas anaranjadas se corresponden con los valles.

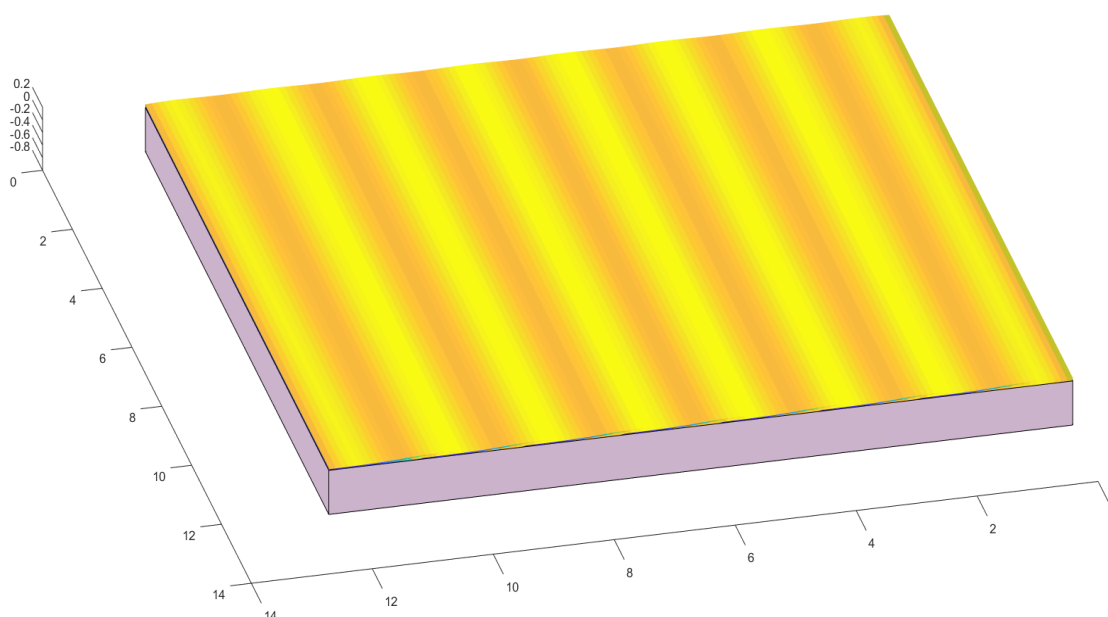


Figura 65: Simulación proyección Pr 1 optimizada.

Análogamente, para la segunda proyección, la desviación típica para este caso es 7,19 cm y la cantidad que se depositó experimentalmente, 0,447 g. También es conocida la tasa de deposición, que se obtuvo durante la proyección puntual de la aleación de Níquel-Aluminio sin aditivos, 54,6%. Conocida la densidad, el revestimiento tiene un grosor medio de 12 micras.

Debido a que las dimensiones del sustrato y la geometría del soplete son siempre los mismos (a pesar de que existen pequeñas diferencias en función de la boquilla que se emplee) los valores de desviación típica se mantienen, como se ha visto en el apartado anterior, siempre en torno a los 6 ó 7 milímetros. Como las condiciones de tiempo y masa bajo las cuales se ha desarrollado cada proyección de trayectoria son similares, los resultados en cuanto a número de pasadas también lo son. Para esta segunda proyección, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Masa adherida: 0.980709 g.
 Masa perdida en los extremos: 0.090123 g.
 Masa total requerida: 1.88629 g.
 Se consigue un ahorro en material del 14.84 por ciento.
 El número de pasadas debe de ser: 7 .
 Distancia entre la primera y el extremo del substrato: 1.89 mm.
 Distancia entre pasadas sucesivas: 11.34 mm.

Figura 66: Extracto de los resultados teóricos para la proyección Pr 2.

En este caso se aprecia que la mejora en cuanto a la optimización de la cantidad de material y respecto al caso experimental es menor que en la primera proyección. Esto se debe a que la cantidad de materia proyectada fue notablemente menor y además la tasa de deposición es mucho mayor.

Además, cabe señalar, debido a la simplificación del modelo teórico no se tienen en cuenta las pérdidas que habría al inicio y al final de cada pasada.



Figura 67: Imagen de la proyección Pr 2 experimental.

Por último, se analiza la tercera proyección, que experimentalmente mostró una desviación típica de 6,4 mm. En este caso, se emplearon 2,673 gramos de aleación con grafeno, de los cuales tan solo 0,061 quedaron adheridos. Esto implica que el recubrimiento tiene un grosor de centenas de nanómetros, 1 micra aproximadamente. Con estos datos, el resultado obtenido es el siguiente:

```
Masa adherida: 0.0511622 g.
Masa perdida en los extremos: 0.00394964 g.
Masa total requerida: 0.315914 g.
Se consigue un ahorro en material del 88.1813 por ciento.
El número de pasadas debe de ser: 8 .
Distancia entre la primera y el extremo del sustrato: 1.63429 mm.
Distancia entre pasadas sucesivas: 11.44 mm.
```

Figura 68: Extracto de los resultados teóricos para la proyección Pr 3.

El resultado que arroja la optimización es extremadamente optimista, ya que plantea un ahorro en material cercano al 90%. Podría deberse a que la tasa de deposición para el ensayo puntual, en el cual se acumula material sobre material, no es exactamente la misma que para este caso, ya que se proyecta una cantidad de material muy pequeña y la mayoría se deposita sobre sustrato y no sobre el mismo material. Es decir, en los ensayos realizados y según los resultados, aparentemente, la tasa de deposición aumenta conforme la cantidad de material que ha sido depositado previamente, evidentemente hasta un límite. Se puede dar el caso en que suceda al contrario. A priori, responde simplemente a razones estadísticas: si un *splat* choca contra el sustrato, existe una probabilidad de que se quede adherido; si este *splat* choca contra otro *splat* ya adherido en el sustrato, la probabilidad de que se solapen es distinta a la primera. Por tanto, combinando estos datos con la probabilidad de impactar con un *splat* o contra el sustrato, se podría obtener un modelo de la evolución de la tasa de deposición. De cualquier modo, a pesar de que se intuye la presencia de este efecto, no se disponen de datos experimentales suficientes como para desarrollar una regla al respecto.

Es importante hacer referencia a que, en este caso, para obtener un modelo lo más simple posible, ya que la finalidad es demostrar la usabilidad de los resultados del análisis de la distribución, se considera que el recubrimiento se genera depositando una única capa de pasadas.

Se podría considerar la situación en que se combinen distintas capas de pasadas, haciendo coincidir los picos de una con los valles de otra, por ejemplo. En cualquier caso, lo expuesto en este documento sienta las bases para desarrollar un método general y, por tanto, se cumple el propósito del mismo.

9. CONCLUSIONES

A partir de una base teórica, extraída del análisis de decenas de artículos especializados en proyección térmica o procesos análogos, se ha desarrollado un proceso experimental para comprobar que dichos fundamentos se cumplen de forma generalizada. El proceso de pulverizado y deposición depende de multitud de factores que determinan la forma en que se genera el revestimiento sobre el sustrato: tipo de sistema de proyección, presión de los gases (si procede), geometría del soplete, dirección de la alimentación de polvos en el soplete (paralela al flujo transportador o no), ángulo de proyección, temperatura, velocidad de las partículas, tiempo en vuelo de estas, temperatura del sustrato, tratamiento previo de este o no, distancia de proyección, etc. Debido a que existe tal multitud de variables es muy complejo determinar un modelo general puramente teórico para predecir cómo será el revestimiento.

Por todo ello, se plantea un método que combina aspectos experimentales y teóricos: se lleva a cabo una proyección puntual bajo las mismas condiciones (distancia de proyección, presión de los gases...) en las que se desarrollará el pulverizado para el revestimiento de una pieza cualquiera y en función de esta proyección se extraerá ciertos parámetros para el cálculo teórico, como desviación típica que caracteriza la distribución de la masa o la tasa de deposición. Es decir, para un caso cualquiera, el procedimiento sería el siguiente: el técnico encargado de la proyección conoce, bien por qué lo establece el fabricante (del soplete, de los polvos o de ambos) o bien por conocimiento propio, parámetros como la distancia de proyección, la boquilla que se debe de emplear y el uso o no de una capa intermedia para mejorar la adherencia y el grosor de la misma, y bajo esas mismas condiciones realiza un ensayo puntual que, simplemente fotografiando la muestra de perfil con una resolución suficiente y pesando el sustrato antes y después de la prueba, le permite conocer cuál es la trayectoria optima gracias al algoritmo de optimización y usando como entradas los parámetros previamente nombrados y un modelo tridimensional del área sobre la que se debe generar el recubrimiento final.

La inversión de recursos en el diseño de una metodología para determinar, en base a una muestra real, ciertas características de la proyección que se desea realizar, así como en un futuro algoritmo genérico que permita la optimización de la trayectoria de proyección para una condición de trabajo determinada, está justificada debido al alto porcentaje de pérdidas de material que, según se ha contrastado, se llegan a tener en la industria. Esto significa que permitirá ahorrar costes gracias a la disminución de las mermas. Además, permitirá obtener superficies más homogéneas.

A esto cabe añadir que recientemente se ha incrementado el uso comercial de materiales avanzados, los cuales son notablemente más caros que los tradicionales. Dicha situación evidencia todavía más la necesidad de optimizar el uso de material para conseguir un proceso altamente competitivo en el mercado frente a las alternativas.

Más allá de la motivación económica, no se debe olvidar la dificultad que supone el tratamiento de residuos que contienen partículas de tamaño micrométrico o incluso nanométrico. Por lo que la disminución de las mermas mejora la sostenibilidad del proceso y disminuye los riesgos para el ser humano

10. BIBLIOGRAFÍA

- [0] Lech Pawlowski, (2008), The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd
- [1] Erik Bertilsson, (2012), Identification of business cases for HVOF technology, Stockholm, Sweden: KTH Industrial Engineering and Management
- [2] Carl C. Koch, (2007), Nanostructured Materials. Processing, Properties, and Applications, Norwich, NY, United States of America: William Andrew Publishing
- [3] Erja Turunen, (2005), Diagnostic tools for HVOF process optimization, Espoo, Finland: Department of Materials Science and Engineering, Helsinki University of Technology
- [4] Pierre Fauchais, Ghislain Montavon, R S Lima, B R Marple. Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructured particles, suspensions and solutions: an invited review. Journal of Physics D: Applied Physics, IOP Publishing, 2011, 44 (9), pp.93001.
- [5] John G. Goedjen, Robert A. Miller and William J. Brindley, A simulation technique for predicting thickness of thermal sprayed coating, <https://ntrs.nasa.gov>
- [6] Jing-Song Gong, Wei-Biao Fu, The experimental study on the flow characteristics for a swirling gas-liquid spray atomizer, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2886–2892
- [7] D.P. Jones, A.P. Watkins, Droplet size and velocity distributions for spray modelling, Journal of Computational Physics 231 (2012) 676–692
- [8] A. Sadovoy, Modeling and offline simulation of thermal spray coating process for gas turbine applications, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Darmstadt

- [9] C. Chen, Y. Xie, C. Verdy, H. Liao, S. Deng, Modelling of coating thickness distribution and its application in offline programming software, *Surface & Coatings Technology* 318 (2017) 315-325
- [10] F. Fanicchia, D.A. Axinte, Transient three-dimensional geometrical/thermal modelling of thermal spray: Normal-impinging jet and single straight deposits, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 122 (2018) 1327–1342
- [11] Jiangwei Liu, Yan Wang, Hu Li, Sophie Costil, Rodolphe Bolot, Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical behavior of NiCrBSi coatings during the plasma spray process. *Journal of Materials Processing Tech.* 249 (2017) 471-478
- [12] Mao Jie, Liu Min, Deng Ziqian, Deng Changguang, Deng Chunming, Zhou Kesong, Influence of Spray Angle on Distribution of WC-Co-Cr Coating Produced by HVOF Spraying, *Rare Metal Materials and Engineering* 46 (2017) 3583-3588
- [13] X.D. Diao, S.X. Zeng, Vivian W.Y. Tamb, Development of an optimal trajectory model for spray painting on a free surface, *Computers & Industrial Engineering* 57 (2009) 209–216
- [14] Tao Zhang, Bo Dong, Xiaohong Chen, Zhonghua Qiu, Rui Jiang, Weizhong Li, Spray characteristics of pressure-swirl nozzles at different nozzle diameters, *Applied Thermal Engineering* 121 (2017) 984–991
- [15] Florin-Iuliu Trifa, Ghislain Montavon, Christian Coddet, On the relationships between the geometric processing parameters of APS and the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ deposit shapes, *Surface & Coatings Technology* 195 (2005) 54– 69
- [16] Jianzhong Lin, Lijuan Qian, Hongbin Xiong, Tat Leung Chan, Effects of operating conditions on droplet deposition onto surface of atomization impinging spray, *Surface & Coatings Technology* 203 (2009) 1733–1740

- [17] Maria Oksa, Erja Turunen, Tomi Suhonen, Tommi Varis and Simo-Pekka Hannula, Optimization and Characterization of High Velocity P-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications, Coatings 1 (2011) 17-52
- [18] Alexander Kout, Heinrich Müller, Parameter optimization for spray coating, Advances in Engineering Software 40 (2009) 1078–1086
- [19] Graphene based materials and their composites as coatings, Yao Tong, Siva Bohm and Mo Song, Department of Materials, Loughborough University

ANEXOS

INDICE DE LOS ANEXOS

1. DATOS	140
2. CÁLCULOS	156
3. CÓDIGO	165
4. CATÁLOGOS	174

1.DATOS

A continuación, se presentan distintas tablas con datos asociados al desarrollo empírico y su posterior análisis.

1.1. PROYECCIONES

En primer lugar, se caracterizan las 9 proyecciones empleadas para el estudio:

MUESTRA	MATERIAL PROYECTADO	TIEMPO (s)	MASA (g)	GRAFENO (g)	GRAFENO (%)
1	Al ₂ O ₃ -TiO ₂	36	18,000	0,000	0,00
2	Al ₂ O ₃ -TiO ₃	45	17,946	0,054	0,30
3	Al ₂ O ₃ -TiO ₄	33	17,820	0,180	1,00
4	Ni-Al	23	18,000	0,000	0,00
5	Ni-Al	44	17,946	0,054	0,30
6	Ni-Al	67	17,820	0,180	1,00
7	NiCrBSi	123	18,000	0,000	0,00
8	NiCrBSi	145	17,946	0,054	0,30
9	NiCrBSi	154	17,820	0,180	1,00

Tabla 3: Material empleado en cada proyección.

En la siguiente tabla se presentan los resultados observados para cada uno de los experimentos descritos, donde “AZ” hace referencia al azulejo empleado como sustrato:

MUESTRA	AZ	MASA ₀ AZ (g)	MASA _f AZ (g)	MASA DEP. (g)	TASA DEP. (%)
1	16	217,308	218,042	0,734	4,08
2	15	206,922	208,563	1,641	9,12
3	20	217,648	220,601	2,953	16,41
4	18	218,894	228,714	9,82	54,56
5	10	214,159	223,61	9,451	52,51
6	14	214,682	222,303	7,621	42,34
7	6	219,565	225,153	5,588	31,04
8	19	207,755	214,165	6,41	35,61
9	17	218,291	223,776	5,485	30,47

Tabla 4: Resultados deposición proyecciones.

1.2. DISTRIBUCIÓN MASA

En la siguiente tabla se muestran, en naranja, los datos correspondientes al primer análisis de uno de los perfiles generados mediante proyección térmica siguiendo el método descrito en el apartado 7.1 (figura 46).

A partir de estos se obtienen las dimensiones reales aplicando un factor de conversión y se obtienen los datos de las tres columnas siguientes (de ellos, el de más a la derecha se corresponde con la tasa de deposición, es decir, el grosor acumulado por segundo, ya que el tiempo de proyección es conocido).

Las dos columnas siguientes, en azul oscuro, se corresponden con las frecuencias relativa y acumulada de la serie de puntos (la segunda ha sido representada en la figura 47).

Por último, en verde, se presentan los datos teóricos correspondientes al eje y, tanto en milímetros como en milímetros por segundo.

	CUADRÍCULA		DIMENSIONES REALES					VAL. TEOR.	
	EJE X (uds)	EJE Y (uds)	EJE X (mm)	EJE Y (mm)	EJE Y (mm/s)	FREC. REL.	FREC. AC.	EJE Y (mm/s)	EJE Y (mm)
1	-269	1	-21,1288	0,0785	0,0012		0,0000	0,0004	0,0264
2	-268	2	-21,0503	0,1571	0,0024	0,0002	0,0002	0,0004	0,0274
3	-267	2	-20,9717	0,1571	0,0024	0,0002	0,0004	0,0004	0,0284
4	-266	1	-20,8932	0,0785	0,0012	0,0001	0,0005	0,0004	0,0295
5	-265	1	-20,8146	0,0785	0,0012	0,0001	0,0006	0,0005	0,0306
6	-264	1	-20,7361	0,0785	0,0012	0,0001	0,0007	0,0005	0,0317
7	-263	1	-20,6575	0,0785	0,0012	0,0001	0,0007	0,0005	0,0329
8	-262	2	-20,5790	0,1571	0,0024	0,0002	0,0009	0,0005	0,0341
9	-261	2	-20,5004	0,1571	0,0024	0,0002	0,0011	0,0005	0,0354
10	-260	2	-20,4219	0,1571	0,0024	0,0002	0,0013	0,0006	0,0367
11	-259	1	-20,3434	0,0785	0,0012	0,0001	0,0014	0,0006	0,0380
12	-258	1	-20,2648	0,0785	0,0012	0,0001	0,0015	0,0006	0,0394
13	-257	1	-20,1863	0,0785	0,0012	0,0001	0,0016	0,0006	0,0408
14	-256	1	-20,1077	0,0785	0,0012	0,0001	0,0017	0,0006	0,0423
15	-255	2	-20,0292	0,1571	0,0024	0,0002	0,0019	0,0007	0,0438
16	-254	3	-19,9506	0,2356	0,0036	0,0003	0,0021	0,0007	0,0454
17	-253	2	-19,8721	0,1571	0,0024	0,0002	0,0023	0,0007	0,0470
18	-252	1	-19,7935	0,0785	0,0012	0,0001	0,0024	0,0007	0,0487
19	-251	2	-19,7150	0,1571	0,0024	0,0002	0,0026	0,0008	0,0504
20	-250	2	-19,6364	0,1571	0,0024	0,0002	0,0028	0,0008	0,0522
21	-249	2	-19,5579	0,1571	0,0024	0,0002	0,0030	0,0008	0,0540
22	-248	2	-19,4794	0,1571	0,0024	0,0002	0,0032	0,0008	0,0559
23	-247	3	-19,4008	0,2356	0,0036	0,0003	0,0034	0,0009	0,0578
24	-246	3	-19,3223	0,2356	0,0036	0,0003	0,0037	0,0009	0,0599
25	-245	3	-19,2437	0,2356	0,0036	0,0003	0,0040	0,0009	0,0619
26	-244	2	-19,1652	0,1571	0,0024	0,0002	0,0042	0,0010	0,0641
27	-243	2	-19,0866	0,1571	0,0024	0,0002	0,0044	0,0010	0,0663
28	-242	2	-19,0081	0,1571	0,0024	0,0002	0,0046	0,0010	0,0685
29	-241	2	-18,9295	0,1571	0,0024	0,0002	0,0048	0,0011	0,0708
30	-240	3	-18,8510	0,2356	0,0036	0,0003	0,0050	0,0011	0,0732
31	-239	2	-18,7724	0,1571	0,0024	0,0002	0,0052	0,0011	0,0757
32	-238	2	-18,6939	0,1571	0,0024	0,0002	0,0054	0,0012	0,0782
33	-237	3	-18,6154	0,2356	0,0036	0,0003	0,0057	0,0012	0,0809
34	-236	3	-18,5368	0,2356	0,0036	0,0003	0,0060	0,0013	0,0836
35	-235	2	-18,4583	0,1571	0,0024	0,0002	0,0062	0,0013	0,0863
36	-234	2	-18,3797	0,1571	0,0024	0,0002	0,0063	0,0014	0,0892
37	-233	2	-18,3012	0,1571	0,0024	0,0002	0,0065	0,0014	0,0921
38	-232	2	-18,2226	0,1571	0,0024	0,0002	0,0067	0,0014	0,0951
39	-231	2	-18,1441	0,1571	0,0024	0,0002	0,0069	0,0015	0,0982
40	-230	2	-18,0655	0,1571	0,0024	0,0002	0,0071	0,0015	0,1014
41	-229	3	-17,9870	0,2356	0,0036	0,0003	0,0074	0,0016	0,1047
42	-228	3	-17,9084	0,2356	0,0036	0,0003	0,0076	0,0016	0,1080
43	-227	3	-17,8299	0,2356	0,0036	0,0003	0,0079	0,0017	0,1115

44	-226	3	-17,7513	0,2356	0,0036	0,0003	0,0082	0,0017	0,1150
45	-225	3	-17,6728	0,2356	0,0036	0,0003	0,0085	0,0018	0,1187
46	-224	3	-17,5943	0,2356	0,0036	0,0003	0,0088	0,0019	0,1224
47	-223	3	-17,5157	0,2356	0,0036	0,0003	0,0090	0,0019	0,1263
48	-222	2	-17,4372	0,1571	0,0024	0,0002	0,0092	0,0020	0,1302
49	-221	2	-17,3586	0,1571	0,0024	0,0002	0,0094	0,0020	0,1343
50	-220	3	-17,2801	0,2356	0,0036	0,0003	0,0097	0,0021	0,1384
51	-219	3	-17,2015	0,2356	0,0036	0,0003	0,0100	0,0022	0,1427
52	-218	3	-17,1230	0,2356	0,0036	0,0003	0,0103	0,0022	0,1471
53	-217	3	-17,0444	0,2356	0,0036	0,0003	0,0105	0,0023	0,1516
54	-216	3	-16,9659	0,2356	0,0036	0,0003	0,0108	0,0024	0,1562
55	-215	3	-16,8873	0,2356	0,0036	0,0003	0,0111	0,0024	0,1609
56	-214	4	-16,8088	0,3142	0,0048	0,0004	0,0115	0,0025	0,1658
57	-213	4	-16,7303	0,3142	0,0048	0,0004	0,0118	0,0026	0,1707
58	-212	3	-16,6517	0,2356	0,0036	0,0003	0,0121	0,0027	0,1758
59	-211	3	-16,5732	0,2356	0,0036	0,0003	0,0124	0,0027	0,1811
60	-210	3	-16,4946	0,2356	0,0036	0,0003	0,0127	0,0028	0,1864
61	-209	4	-16,4161	0,3142	0,0048	0,0004	0,0130	0,0029	0,1919
62	-208	4	-16,3375	0,3142	0,0048	0,0004	0,0134	0,0030	0,1975
63	-207	4	-16,2590	0,3142	0,0048	0,0004	0,0138	0,0031	0,2033
64	-206	4	-16,1804	0,3142	0,0048	0,0004	0,0142	0,0032	0,2092
65	-205	4	-16,1019	0,3142	0,0048	0,0004	0,0145	0,0033	0,2152
66	-204	4	-16,0233	0,3142	0,0048	0,0004	0,0149	0,0034	0,2214
67	-203	4	-15,9448	0,3142	0,0048	0,0004	0,0153	0,0035	0,2277
68	-202	4	-15,8662	0,3142	0,0048	0,0004	0,0157	0,0035	0,2342
69	-201	4	-15,7877	0,3142	0,0048	0,0004	0,0160	0,0036	0,2408
70	-200	4	-15,7092	0,3142	0,0048	0,0004	0,0164	0,0038	0,2476
71	-199	4	-15,6306	0,3142	0,0048	0,0004	0,0168	0,0039	0,2545
72	-198	5	-15,5521	0,3927	0,0060	0,0005	0,0172	0,0040	0,2616
73	-197	5	-15,4735	0,3927	0,0060	0,0005	0,0177	0,0041	0,2688
74	-196	5	-15,3950	0,3927	0,0060	0,0005	0,0182	0,0042	0,2763
75	-195	5	-15,3164	0,3927	0,0060	0,0005	0,0186	0,0043	0,2838
76	-194	5	-15,2379	0,3927	0,0060	0,0005	0,0191	0,0044	0,2916
77	-193	5	-15,1593	0,3927	0,0060	0,0005	0,0196	0,0045	0,2995
78	-192	5	-15,0808	0,3927	0,0060	0,0005	0,0200	0,0047	0,3076
79	-191	5	-15,0022	0,3927	0,0060	0,0005	0,0205	0,0048	0,3158
80	-190	5	-14,9237	0,3927	0,0060	0,0005	0,0210	0,0049	0,3243
81	-189	5	-14,8452	0,3927	0,0060	0,0005	0,0214	0,0050	0,3329
82	-188	5	-14,7666	0,3927	0,0060	0,0005	0,0219	0,0052	0,3417
83	-187	5	-14,6881	0,3927	0,0060	0,0005	0,0224	0,0053	0,3507
84	-186	5	-14,6095	0,3927	0,0060	0,0005	0,0228	0,0055	0,3599
85	-185	6	-14,5310	0,4713	0,0071	0,0006	0,0234	0,0056	0,3692
86	-184	6	-14,4524	0,4713	0,0071	0,0006	0,0239	0,0057	0,3788
87	-183	6	-14,3739	0,4713	0,0071	0,0006	0,0245	0,0059	0,3885
88	-182	6	-14,2953	0,4713	0,0071	0,0006	0,0251	0,0060	0,3984
89	-181	6	-14,2168	0,4713	0,0071	0,0006	0,0256	0,0062	0,4086

90	-180	6	-14,1382	0,4713	0,0071	0,0006	0,0262	0,0063	0,4189
91	-179	6	-14,0597	0,4713	0,0071	0,0006	0,0267	0,0065	0,4295
92	-178	6	-13,9811	0,4713	0,0071	0,0006	0,0273	0,0067	0,4402
93	-177	6	-13,9026	0,4713	0,0071	0,0006	0,0279	0,0068	0,4511
94	-176	6	-13,8241	0,4713	0,0071	0,0006	0,0284	0,0070	0,4623
95	-175	6	-13,7455	0,4713	0,0071	0,0006	0,0290	0,0072	0,4737
96	-174	7	-13,6670	0,5498	0,0083	0,0007	0,0296	0,0074	0,4853
97	-173	7	-13,5884	0,5498	0,0083	0,0007	0,0303	0,0075	0,4970
98	-172	7	-13,5099	0,5498	0,0083	0,0007	0,0309	0,0077	0,5091
99	-171	7	-13,4313	0,5498	0,0083	0,0007	0,0316	0,0079	0,5213
100	-170	7	-13,3528	0,5498	0,0083	0,0007	0,0322	0,0081	0,5337
101	-169	7	-13,2742	0,5498	0,0083	0,0007	0,0329	0,0083	0,5464
102	-168	7	-13,1957	0,5498	0,0083	0,0007	0,0335	0,0085	0,5593
103	-167	7	-13,1171	0,5498	0,0083	0,0007	0,0342	0,0087	0,5724
104	-166	7	-13,0386	0,5498	0,0083	0,0007	0,0349	0,0089	0,5858
105	-165	8	-12,9601	0,6284	0,0095	0,0007	0,0356	0,0091	0,5993
106	-164	8	-12,8815	0,6284	0,0095	0,0007	0,0363	0,0093	0,6131
107	-163	8	-12,8030	0,6284	0,0095	0,0007	0,0371	0,0095	0,6272
108	-162	8	-12,7244	0,6284	0,0095	0,0007	0,0378	0,0097	0,6414
109	-161	8	-12,6459	0,6284	0,0095	0,0007	0,0386	0,0099	0,6559
110	-160	8	-12,5673	0,6284	0,0095	0,0007	0,0393	0,0102	0,6707
111	-159	8	-12,4888	0,6284	0,0095	0,0007	0,0401	0,0104	0,6856
112	-158	8	-12,4102	0,6284	0,0095	0,0007	0,0408	0,0106	0,7008
113	-157	9	-12,3317	0,7069	0,0107	0,0008	0,0417	0,0109	0,7163
114	-156	9	-12,2531	0,7069	0,0107	0,0008	0,0425	0,0111	0,7320
115	-155	9	-12,1746	0,7069	0,0107	0,0008	0,0433	0,0113	0,7479
116	-154	9	-12,0961	0,7069	0,0107	0,0008	0,0442	0,0116	0,7641
117	-153	9	-12,0175	0,7069	0,0107	0,0008	0,0450	0,0118	0,7805
118	-152	9	-11,9390	0,7069	0,0107	0,0008	0,0458	0,0121	0,7971
119	-151	10	-11,8604	0,7855	0,0119	0,0009	0,0468	0,0123	0,8140
120	-150	10	-11,7819	0,7855	0,0119	0,0009	0,0477	0,0126	0,8311
121	-149	10	-11,7033	0,7855	0,0119	0,0009	0,0486	0,0129	0,8485
122	-148	10	-11,6248	0,7855	0,0119	0,0009	0,0496	0,0131	0,8661
123	-147	10	-11,5462	0,7855	0,0119	0,0009	0,0505	0,0134	0,8840
124	-146	10	-11,4677	0,7855	0,0119	0,0009	0,0514	0,0137	0,9021
125	-145	11	-11,3891	0,8640	0,0131	0,0010	0,0525	0,0139	0,9205
126	-144	11	-11,3106	0,8640	0,0131	0,0010	0,0535	0,0142	0,9391
127	-143	11	-11,2320	0,8640	0,0131	0,0010	0,0545	0,0145	0,9579
128	-142	11	-11,1535	0,8640	0,0131	0,0010	0,0555	0,0148	0,9770
129	-141	11	-11,0750	0,8640	0,0131	0,0010	0,0566	0,0151	0,9963
130	-140	11	-10,9964	0,8640	0,0131	0,0010	0,0576	0,0154	1,0159
131	-139	12	-10,9179	0,9425	0,0143	0,0011	0,0587	0,0157	1,0357
132	-138	12	-10,8393	0,9425	0,0143	0,0011	0,0598	0,0160	1,0557
133	-137	12	-10,7608	0,9425	0,0143	0,0011	0,0609	0,0163	1,0760
134	-136	13	-10,6822	1,0211	0,0155	0,0012	0,0622	0,0166	1,0965
135	-135	13	-10,6037	1,0211	0,0155	0,0012	0,0634	0,0169	1,1173

136	-134	13	-10,5251	1,0211	0,0155	0,0012	0,0646	0,0172	1,1383
137	-133	13	-10,4466	1,0211	0,0155	0,0012	0,0658	0,0176	1,1595
138	-132	13	-10,3680	1,0211	0,0155	0,0012	0,0670	0,0179	1,1810
139	-131	14	-10,2895	1,0996	0,0167	0,0013	0,0683	0,0182	1,2026
140	-130	14	-10,2110	1,0996	0,0167	0,0013	0,0696	0,0186	1,2246
141	-129	14	-10,1324	1,0996	0,0167	0,0013	0,0709	0,0189	1,2467
142	-128	14	-10,0539	1,0996	0,0167	0,0013	0,0722	0,0192	1,2691
143	-127	14	-9,9753	1,0996	0,0167	0,0013	0,0735	0,0196	1,2917
144	-126	15	-9,8968	1,1782	0,0179	0,0014	0,0749	0,0199	1,3145
145	-125	15	-9,8182	1,1782	0,0179	0,0014	0,0763	0,0203	1,3375
146	-124	15	-9,7397	1,1782	0,0179	0,0014	0,0777	0,0206	1,3608
147	-123	15	-9,6611	1,1782	0,0179	0,0014	0,0791	0,0210	1,3842
148	-122	15	-9,5826	1,1782	0,0179	0,0014	0,0805	0,0213	1,4079
149	-121	16	-9,5040	1,2567	0,0190	0,0015	0,0820	0,0217	1,4318
150	-120	16	-9,4255	1,2567	0,0190	0,0015	0,0835	0,0221	1,4559
151	-119	17	-9,3469	1,3353	0,0202	0,0016	0,0851	0,0224	1,4801
152	-118	17	-9,2684	1,3353	0,0202	0,0016	0,0867	0,0228	1,5046
153	-117	17	-9,1899	1,3353	0,0202	0,0016	0,0882	0,0232	1,5293
154	-116	17	-9,1113	1,3353	0,0202	0,0016	0,0898	0,0235	1,5541
155	-115	17	-9,0328	1,3353	0,0202	0,0016	0,0914	0,0239	1,5792
156	-114	17	-8,9542	1,3353	0,0202	0,0016	0,0930	0,0243	1,6044
157	-113	18	-8,8757	1,4138	0,0214	0,0017	0,0947	0,0247	1,6298
158	-112	18	-8,7971	1,4138	0,0214	0,0017	0,0964	0,0251	1,6554
159	-111	18	-8,7186	1,4138	0,0214	0,0017	0,0980	0,0255	1,6811
160	-110	19	-8,6400	1,4924	0,0226	0,0018	0,0998	0,0259	1,7071
161	-109	19	-8,5615	1,4924	0,0226	0,0018	0,1016	0,0263	1,7331
162	-108	19	-8,4829	1,4924	0,0226	0,0018	0,1033	0,0267	1,7593
163	-107	19	-8,4044	1,4924	0,0226	0,0018	0,1051	0,0271	1,7857
164	-106	20	-8,3259	1,5709	0,0238	0,0019	0,1070	0,0275	1,8122
165	-105	20	-8,2473	1,5709	0,0238	0,0019	0,1088	0,0279	1,8389
166	-104	20	-8,1688	1,5709	0,0238	0,0019	0,1107	0,0283	1,8657
167	-103	20	-8,0902	1,5709	0,0238	0,0019	0,1126	0,0287	1,8926
168	-102	21	-8,0117	1,6495	0,0250	0,0020	0,1145	0,0291	1,9196
169	-101	21	-7,9331	1,6495	0,0250	0,0020	0,1165	0,0295	1,9468
170	-100	21	-7,8546	1,6495	0,0250	0,0020	0,1184	0,0299	1,9741
171	-99	22	-7,7760	1,7280	0,0262	0,0021	0,1205	0,0303	2,0014
172	-98	22	-7,6975	1,7280	0,0262	0,0021	0,1225	0,0307	2,0289
173	-97	23	-7,6189	1,8066	0,0274	0,0021	0,1247	0,0312	2,0565
174	-96	23	-7,5404	1,8066	0,0274	0,0021	0,1268	0,0316	2,0841
175	-95	23	-7,4618	1,8066	0,0274	0,0021	0,1290	0,0320	2,1119
176	-94	24	-7,3833	1,8851	0,0286	0,0022	0,1312	0,0324	2,1397
177	-93	24	-7,3048	1,8851	0,0286	0,0022	0,1334	0,0328	2,1675
178	-92	25	-7,2262	1,9636	0,0298	0,0023	0,1358	0,0333	2,1955
179	-91	25	-7,1477	1,9636	0,0298	0,0023	0,1381	0,0337	2,2234
180	-90	25	-7,0691	1,9636	0,0298	0,0023	0,1404	0,0341	2,2515
181	-89	25	-6,9906	1,9636	0,0298	0,0023	0,1428	0,0345	2,2795

182	-88	26	-6,9120	2,0422	0,0309	0,0024	0,1452	0,0350	2,3076
183	-87	26	-6,8335	2,0422	0,0309	0,0024	0,1476	0,0354	2,3357
184	-86	27	-6,7549	2,1207	0,0321	0,0025	0,1501	0,0358	2,3639
185	-85	27	-6,6764	2,1207	0,0321	0,0025	0,1526	0,0362	2,3920
186	-84	27	-6,5978	2,1207	0,0321	0,0025	0,1552	0,0367	2,4202
187	-83	27	-6,5193	2,1207	0,0321	0,0025	0,1577	0,0371	2,4483
188	-82	27	-6,4408	2,1207	0,0321	0,0025	0,1602	0,0375	2,4764
189	-81	28	-6,3622	2,1993	0,0333	0,0026	0,1628	0,0379	2,5045
190	-80	28	-6,2837	2,1993	0,0333	0,0026	0,1654	0,0384	2,5326
191	-79	29	-6,2051	2,2778	0,0345	0,0027	0,1681	0,0388	2,5606
192	-78	30	-6,1266	2,3564	0,0357	0,0028	0,1709	0,0392	2,5886
193	-77	30	-6,0480	2,3564	0,0357	0,0028	0,1737	0,0396	2,6165
194	-76	31	-5,9695	2,4349	0,0369	0,0029	0,1766	0,0401	2,6443
195	-75	31	-5,8909	2,4349	0,0369	0,0029	0,1795	0,0405	2,6721
196	-74	31	-5,8124	2,4349	0,0369	0,0029	0,1824	0,0409	2,6998
197	-73	31	-5,7338	2,4349	0,0369	0,0029	0,1853	0,0413	2,7274
198	-72	32	-5,6553	2,5135	0,0381	0,0030	0,1882	0,0417	2,7549
199	-71	32	-5,5768	2,5135	0,0381	0,0030	0,1912	0,0422	2,7823
200	-70	32	-5,4982	2,5135	0,0381	0,0030	0,1942	0,0426	2,8096
201	-69	33	-5,4197	2,5920	0,0393	0,0031	0,1973	0,0430	2,8367
202	-68	33	-5,3411	2,5920	0,0393	0,0031	0,2004	0,0434	2,8638
203	-67	33	-5,2626	2,5920	0,0393	0,0031	0,2034	0,0438	2,8906
204	-66	33	-5,1840	2,5920	0,0393	0,0031	0,2065	0,0442	2,9174
205	-65	33	-5,1055	2,5920	0,0393	0,0031	0,2096	0,0446	2,9439
206	-64	34	-5,0269	2,6706	0,0405	0,0032	0,2127	0,0450	2,9703
207	-63	34	-4,9484	2,6706	0,0405	0,0032	0,2159	0,0454	2,9966
208	-62	34	-4,8698	2,6706	0,0405	0,0032	0,2191	0,0458	3,0226
209	-61	35	-4,7913	2,7491	0,0417	0,0033	0,2223	0,0462	3,0484
210	-60	35	-4,7127	2,7491	0,0417	0,0033	0,2256	0,0466	3,0741
211	-59	36	-4,6342	2,8276	0,0428	0,0034	0,2290	0,0470	3,0995
212	-58	36	-4,5557	2,8276	0,0428	0,0034	0,2323	0,0473	3,1247
213	-57	37	-4,4771	2,9062	0,0440	0,0034	0,2358	0,0477	3,1497
214	-56	37	-4,3986	2,9062	0,0440	0,0034	0,2392	0,0481	3,1744
215	-55	37	-4,3200	2,9062	0,0440	0,0034	0,2427	0,0485	3,1989
216	-54	37	-4,2415	2,9062	0,0440	0,0034	0,2461	0,0488	3,2231
217	-53	38	-4,1629	2,9847	0,0452	0,0035	0,2497	0,0492	3,2470
218	-52	38	-4,0844	2,9847	0,0452	0,0035	0,2532	0,0496	3,2707
219	-51	39	-4,0058	3,0633	0,0464	0,0036	0,2568	0,0499	3,2941
220	-50	39	-3,9273	3,0633	0,0464	0,0036	0,2605	0,0503	3,3172
221	-49	40	-3,8487	3,1418	0,0476	0,0037	0,2642	0,0506	3,3400
222	-48	40	-3,7702	3,1418	0,0476	0,0037	0,2679	0,0509	3,3625
223	-47	40	-3,6917	3,1418	0,0476	0,0037	0,2716	0,0513	3,3847
224	-46	41	-3,6131	3,2204	0,0488	0,0038	0,2755	0,0516	3,4066
225	-45	41	-3,5346	3,2204	0,0488	0,0038	0,2793	0,0519	3,4281
226	-44	42	-3,4560	3,2989	0,0500	0,0039	0,2832	0,0523	3,4493
227	-43	42	-3,3775	3,2989	0,0500	0,0039	0,2871	0,0526	3,4701

228	-42	42	-3,2989	3,2989	0,0500	0,0039	0,2910	0,0529	3,4906
229	-41	43	-3,2204	3,3775	0,0512	0,0040	0,2950	0,0532	3,5107
230	-40	43	-3,1418	3,3775	0,0512	0,0040	0,2990	0,0535	3,5304
231	-39	43	-3,0633	3,3775	0,0512	0,0040	0,3030	0,0538	3,5498
232	-38	43	-2,9847	3,3775	0,0512	0,0040	0,3071	0,0541	3,5687
233	-37	44	-2,9062	3,4560	0,0524	0,0041	0,3112	0,0544	3,5873
234	-36	44	-2,8276	3,4560	0,0524	0,0041	0,3153	0,0546	3,6055
235	-35	44	-2,7491	3,4560	0,0524	0,0041	0,3194	0,0549	3,6232
236	-34	45	-2,6706	3,5346	0,0536	0,0042	0,3235	0,0552	3,6406
237	-33	45	-2,5920	3,5346	0,0536	0,0042	0,3277	0,0554	3,6575
238	-32	45	-2,5135	3,5346	0,0536	0,0042	0,3319	0,0557	3,6740
239	-31	45	-2,4349	3,5346	0,0536	0,0042	0,3361	0,0559	3,6900
240	-30	45	-2,3564	3,5346	0,0536	0,0042	0,3403	0,0561	3,7056
241	-29	46	-2,2778	3,6131	0,0547	0,0043	0,3446	0,0564	3,7208
242	-28	46	-2,1993	3,6131	0,0547	0,0043	0,3489	0,0566	3,7355
243	-27	46	-2,1207	3,6131	0,0547	0,0043	0,3532	0,0568	3,7497
244	-26	46	-2,0422	3,6131	0,0547	0,0043	0,3575	0,0570	3,7635
245	-25	47	-1,9636	3,6917	0,0559	0,0044	0,3618	0,0572	3,7768
246	-24	47	-1,8851	3,6917	0,0559	0,0044	0,3662	0,0574	3,7897
247	-23	47	-1,8066	3,6917	0,0559	0,0044	0,3706	0,0576	3,8020
248	-22	47	-1,7280	3,6917	0,0559	0,0044	0,3750	0,0578	3,8139
249	-21	47	-1,6495	3,6917	0,0559	0,0044	0,3794	0,0580	3,8252
250	-20	47	-1,5709	3,6917	0,0559	0,0044	0,3837	0,0581	3,8361
251	-19	47	-1,4924	3,6917	0,0559	0,0044	0,3881	0,0583	3,8465
252	-18	47	-1,4138	3,6917	0,0559	0,0044	0,3925	0,0584	3,8563
253	-17	48	-1,3353	3,7702	0,0571	0,0045	0,3970	0,0586	3,8657
254	-16	48	-1,2567	3,7702	0,0571	0,0045	0,4015	0,0587	3,8745
255	-15	48	-1,1782	3,7702	0,0571	0,0045	0,4059	0,0588	3,8828
256	-14	49	-1,0996	3,8487	0,0583	0,0046	0,4105	0,0589	3,8906
257	-13	49	-1,0211	3,8487	0,0583	0,0046	0,4151	0,0591	3,8979
258	-12	49	-0,9425	3,8487	0,0583	0,0046	0,4196	0,0592	3,9047
259	-11	49	-0,8640	3,8487	0,0583	0,0046	0,4242	0,0593	3,9109
260	-10	49	-0,7855	3,8487	0,0583	0,0046	0,4288	0,0593	3,9166
261	-9	49	-0,7069	3,8487	0,0583	0,0046	0,4333	0,0594	3,9217
262	-8	49	-0,6284	3,8487	0,0583	0,0046	0,4379	0,0595	3,9263
263	-7	50	-0,5498	3,9273	0,0595	0,0047	0,4425	0,0596	3,9304
264	-6	50	-0,4713	3,9273	0,0595	0,0047	0,4472	0,0596	3,9340
265	-5	50	-0,3927	3,9273	0,0595	0,0047	0,4519	0,0597	3,9370
266	-4	50	-0,3142	3,9273	0,0595	0,0047	0,4565	0,0597	3,9394
267	-3	50	-0,2356	3,9273	0,0595	0,0047	0,4612	0,0597	3,9413
268	-2	50	-0,1571	3,9273	0,0595	0,0047	0,4658	0,0597	3,9427
269	-1	50	-0,0785	3,9273	0,0595	0,0047	0,4705	0,0598	3,9435
270	0	50	0,0000	3,9273	0,0595	0,0047	0,4752	0,0598	3,9438
271	1	50	0,0785	3,9273	0,0595	0,0047	0,4798	0,0598	3,9435
272	2	50	0,1571	3,9273	0,0595	0,0047	0,4845	0,0597	3,9427
273	3	50	0,2356	3,9273	0,0595	0,0047	0,4891	0,0597	3,9413

274	4	50	0,3142	3,9273	0,0595	0,0047	0,4938	0,0597	3,9394
275	5	50	0,3927	3,9273	0,0595	0,0047	0,4985	0,0597	3,9370
276	6	50	0,4713	3,9273	0,0595	0,0047	0,5031	0,0596	3,9340
277	7	50	0,5498	3,9273	0,0595	0,0047	0,5078	0,0596	3,9304
278	8	50	0,6284	3,9273	0,0595	0,0047	0,5124	0,0595	3,9263
279	9	50	0,7069	3,9273	0,0595	0,0047	0,5171	0,0594	3,9217
280	10	50	0,7855	3,9273	0,0595	0,0047	0,5218	0,0593	3,9166
281	11	49	0,8640	3,8487	0,0583	0,0046	0,5263	0,0593	3,9109
282	12	49	0,9425	3,8487	0,0583	0,0046	0,5309	0,0592	3,9047
283	13	49	1,0211	3,8487	0,0583	0,0046	0,5355	0,0591	3,8979
284	14	49	1,0996	3,8487	0,0583	0,0046	0,5400	0,0589	3,8906
285	15	49	1,1782	3,8487	0,0583	0,0046	0,5446	0,0588	3,8828
286	16	49	1,2567	3,8487	0,0583	0,0046	0,5492	0,0587	3,8745
287	17	49	1,3353	3,8487	0,0583	0,0046	0,5537	0,0586	3,8657
288	18	48	1,4138	3,7702	0,0571	0,0045	0,5582	0,0584	3,8563
289	19	48	1,4924	3,7702	0,0571	0,0045	0,5627	0,0583	3,8465
290	20	48	1,5709	3,7702	0,0571	0,0045	0,5671	0,0581	3,8361
291	21	49	1,6495	3,8487	0,0583	0,0046	0,5717	0,0580	3,8252
292	22	49	1,7280	3,8487	0,0583	0,0046	0,5763	0,0578	3,8139
293	23	47	1,8066	3,6917	0,0559	0,0044	0,5807	0,0576	3,8020
294	24	47	1,8851	3,6917	0,0559	0,0044	0,5850	0,0574	3,7897
295	25	47	1,9636	3,6917	0,0559	0,0044	0,5894	0,0572	3,7768
296	26	47	2,0422	3,6917	0,0559	0,0044	0,5938	0,0570	3,7635
297	27	46	2,1207	3,6131	0,0547	0,0043	0,5981	0,0568	3,7497
298	28	46	2,1993	3,6131	0,0547	0,0043	0,6024	0,0566	3,7355
299	29	46	2,2778	3,6131	0,0547	0,0043	0,6067	0,0564	3,7208
300	30	46	2,3564	3,6131	0,0547	0,0043	0,6109	0,0561	3,7056
301	31	46	2,4349	3,6131	0,0547	0,0043	0,6152	0,0559	3,6900
302	32	46	2,5135	3,6131	0,0547	0,0043	0,6195	0,0557	3,6740
303	33	46	2,5920	3,6131	0,0547	0,0043	0,6238	0,0554	3,6575
304	34	45	2,6706	3,5346	0,0536	0,0042	0,6280	0,0552	3,6406
305	35	45	2,7491	3,5346	0,0536	0,0042	0,6322	0,0549	3,6232
306	36	45	2,8276	3,5346	0,0536	0,0042	0,6364	0,0546	3,6055
307	37	45	2,9062	3,5346	0,0536	0,0042	0,6406	0,0544	3,5873
308	38	45	2,9847	3,5346	0,0536	0,0042	0,6448	0,0541	3,5687
309	39	44	3,0633	3,4560	0,0524	0,0041	0,6489	0,0538	3,5498
310	40	44	3,1418	3,4560	0,0524	0,0041	0,6530	0,0535	3,5304
311	41	44	3,2204	3,4560	0,0524	0,0041	0,6571	0,0532	3,5107
312	42	44	3,2989	3,4560	0,0524	0,0041	0,6612	0,0529	3,4906
313	43	43	3,3775	3,3775	0,0512	0,0040	0,6652	0,0526	3,4701
314	44	43	3,4560	3,3775	0,0512	0,0040	0,6692	0,0523	3,4493
315	45	43	3,5346	3,3775	0,0512	0,0040	0,6732	0,0519	3,4281
316	46	42	3,6131	3,2989	0,0500	0,0039	0,6771	0,0516	3,4066
317	47	42	3,6917	3,2989	0,0500	0,0039	0,6810	0,0513	3,3847
318	48	42	3,7702	3,2989	0,0500	0,0039	0,6849	0,0509	3,3625
319	49	41	3,8487	3,2204	0,0488	0,0038	0,6888	0,0506	3,3400

320	50	41	3,9273	3,2204	0,0488	0,0038	0,6926	0,0503	3,3172
321	51	41	4,0058	3,2204	0,0488	0,0038	0,6964	0,0499	3,2941
322	52	41	4,0844	3,2204	0,0488	0,0038	0,7002	0,0496	3,2707
323	53	40	4,1629	3,1418	0,0476	0,0037	0,7039	0,0492	3,2470
324	54	40	4,2415	3,1418	0,0476	0,0037	0,7077	0,0488	3,2231
325	55	40	4,3200	3,1418	0,0476	0,0037	0,7114	0,0485	3,1989
326	56	40	4,3986	3,1418	0,0476	0,0037	0,7151	0,0481	3,1744
327	57	39	4,4771	3,0633	0,0464	0,0036	0,7188	0,0477	3,1497
328	58	39	4,5557	3,0633	0,0464	0,0036	0,7224	0,0473	3,1247
329	59	39	4,6342	3,0633	0,0464	0,0036	0,7260	0,0470	3,0995
330	60	38	4,7127	2,9847	0,0452	0,0035	0,7296	0,0466	3,0741
331	61	38	4,7913	2,9847	0,0452	0,0035	0,7331	0,0462	3,0484
332	62	37	4,8698	2,9062	0,0440	0,0034	0,7366	0,0458	3,0226
333	63	37	4,9484	2,9062	0,0440	0,0034	0,7400	0,0454	2,9966
334	64	37	5,0269	2,9062	0,0440	0,0034	0,7435	0,0450	2,9703
335	65	36	5,1055	2,8276	0,0428	0,0034	0,7468	0,0446	2,9439
336	66	36	5,1840	2,8276	0,0428	0,0034	0,7502	0,0442	2,9174
337	67	36	5,2626	2,8276	0,0428	0,0034	0,7535	0,0438	2,8906
338	68	35	5,3411	2,7491	0,0417	0,0033	0,7568	0,0434	2,8638
339	69	35	5,4197	2,7491	0,0417	0,0033	0,7600	0,0430	2,8367
340	70	35	5,4982	2,7491	0,0417	0,0033	0,7633	0,0426	2,8096
341	71	34	5,5768	2,6706	0,0405	0,0032	0,7665	0,0422	2,7823
342	72	34	5,6553	2,6706	0,0405	0,0032	0,7696	0,0417	2,7549
343	73	34	5,7338	2,6706	0,0405	0,0032	0,7728	0,0413	2,7274
344	74	34	5,8124	2,6706	0,0405	0,0032	0,7760	0,0409	2,6998
345	75	33	5,8909	2,5920	0,0393	0,0031	0,7791	0,0405	2,6721
346	76	33	5,9695	2,5920	0,0393	0,0031	0,7821	0,0401	2,6443
347	77	33	6,0480	2,5920	0,0393	0,0031	0,7852	0,0396	2,6165
348	78	32	6,1266	2,5135	0,0381	0,0030	0,7882	0,0392	2,5886
349	79	32	6,2051	2,5135	0,0381	0,0030	0,7912	0,0388	2,5606
350	80	32	6,2837	2,5135	0,0381	0,0030	0,7941	0,0384	2,5326
351	81	31	6,3622	2,4349	0,0369	0,0029	0,7970	0,0379	2,5045
352	82	31	6,4408	2,4349	0,0369	0,0029	0,7999	0,0375	2,4764
353	83	31	6,5193	2,4349	0,0369	0,0029	0,8028	0,0371	2,4483
354	84	30	6,5978	2,3564	0,0357	0,0028	0,8056	0,0367	2,4202
355	85	30	6,6764	2,3564	0,0357	0,0028	0,8084	0,0362	2,3920
356	86	30	6,7549	2,3564	0,0357	0,0028	0,8112	0,0358	2,3639
357	87	29	6,8335	2,2778	0,0345	0,0027	0,8139	0,0354	2,3357
358	88	29	6,9120	2,2778	0,0345	0,0027	0,8166	0,0350	2,3076
359	89	29	6,9906	2,2778	0,0345	0,0027	0,8193	0,0345	2,2795
360	90	28	7,0691	2,1993	0,0333	0,0026	0,8219	0,0341	2,2515
361	91	28	7,1477	2,1993	0,0333	0,0026	0,8245	0,0337	2,2234
362	92	28	7,2262	2,1993	0,0333	0,0026	0,8271	0,0333	2,1955
363	93	28	7,3048	2,1993	0,0333	0,0026	0,8297	0,0328	2,1675
364	94	27	7,3833	2,1207	0,0321	0,0025	0,8323	0,0324	2,1397
365	95	27	7,4618	2,1207	0,0321	0,0025	0,8348	0,0320	2,1119

366	96	27	7,5404	2,1207	0,0321	0,0025	0,8373	0,0316	2,0841
367	97	26	7,6189	2,0422	0,0309	0,0024	0,8397	0,0312	2,0565
368	98	26	7,6975	2,0422	0,0309	0,0024	0,8421	0,0307	2,0289
369	99	26	7,7760	2,0422	0,0309	0,0024	0,8446	0,0303	2,0014
370	100	25	7,8546	1,9636	0,0298	0,0023	0,8469	0,0299	1,9741
371	101	25	7,9331	1,9636	0,0298	0,0023	0,8492	0,0295	1,9468
372	102	25	8,0117	1,9636	0,0298	0,0023	0,8516	0,0291	1,9196
373	103	25	8,0902	1,9636	0,0298	0,0023	0,8539	0,0287	1,8926
374	104	24	8,1688	1,8851	0,0286	0,0022	0,8561	0,0283	1,8657
375	105	24	8,2473	1,8851	0,0286	0,0022	0,8584	0,0279	1,8389
376	106	24	8,3259	1,8851	0,0286	0,0022	0,8606	0,0275	1,8122
377	107	23	8,4044	1,8066	0,0274	0,0021	0,8627	0,0271	1,7857
378	108	23	8,4829	1,8066	0,0274	0,0021	0,8649	0,0267	1,7593
379	109	23	8,5615	1,8066	0,0274	0,0021	0,8670	0,0263	1,7331
380	110	23	8,6400	1,8066	0,0274	0,0021	0,8692	0,0259	1,7071
381	111	23	8,7186	1,8066	0,0274	0,0021	0,8713	0,0255	1,6811
382	112	22	8,7971	1,7280	0,0262	0,0021	0,8734	0,0251	1,6554
383	113	22	8,8757	1,7280	0,0262	0,0021	0,8754	0,0247	1,6298
384	114	22	8,9542	1,7280	0,0262	0,0021	0,8775	0,0243	1,6044
385	115	21	9,0328	1,6495	0,0250	0,0020	0,8794	0,0239	1,5792
386	116	21	9,1113	1,6495	0,0250	0,0020	0,8814	0,0235	1,5541
387	117	21	9,1899	1,6495	0,0250	0,0020	0,8833	0,0232	1,5293
388	118	20	9,2684	1,5709	0,0238	0,0019	0,8852	0,0228	1,5046
389	119	20	9,3469	1,5709	0,0238	0,0019	0,8871	0,0224	1,4801
390	120	20	9,4255	1,5709	0,0238	0,0019	0,8889	0,0221	1,4559
391	121	19	9,5040	1,4924	0,0226	0,0018	0,8907	0,0217	1,4318
392	122	19	9,5826	1,4924	0,0226	0,0018	0,8925	0,0213	1,4079
393	123	19	9,6611	1,4924	0,0226	0,0018	0,8942	0,0210	1,3842
394	124	19	9,7397	1,4924	0,0226	0,0018	0,8960	0,0206	1,3608
395	125	18	9,8182	1,4138	0,0214	0,0017	0,8977	0,0203	1,3375
396	126	18	9,8968	1,4138	0,0214	0,0017	0,8994	0,0199	1,3145
397	127	18	9,9753	1,4138	0,0214	0,0017	0,9010	0,0196	1,2917
398	128	18	10,0539	1,4138	0,0214	0,0017	0,9027	0,0192	1,2691
399	129	18	10,1324	1,4138	0,0214	0,0017	0,9044	0,0189	1,2467
400	130	17	10,2110	1,3353	0,0202	0,0016	0,9060	0,0186	1,2246
401	131	17	10,2895	1,3353	0,0202	0,0016	0,9076	0,0182	1,2026
402	132	17	10,3680	1,3353	0,0202	0,0016	0,9091	0,0179	1,1810
403	133	16	10,4466	1,2567	0,0190	0,0015	0,9106	0,0176	1,1595
404	134	16	10,5251	1,2567	0,0190	0,0015	0,9121	0,0172	1,1383
405	135	16	10,6037	1,2567	0,0190	0,0015	0,9136	0,0169	1,1173
406	136	16	10,6822	1,2567	0,0190	0,0015	0,9151	0,0166	1,0965
407	137	16	10,7608	1,2567	0,0190	0,0015	0,9166	0,0163	1,0760
408	138	15	10,8393	1,1782	0,0179	0,0014	0,9180	0,0160	1,0557
409	139	15	10,9179	1,1782	0,0179	0,0014	0,9194	0,0157	1,0357
410	140	15	10,9964	1,1782	0,0179	0,0014	0,9208	0,0154	1,0159
411	141	15	11,0750	1,1782	0,0179	0,0014	0,9222	0,0151	0,9963

412	142	15	11,1535	1,1782	0,0179	0,0014	0,9236	0,0148	0,9770
413	143	14	11,2320	1,0996	0,0167	0,0013	0,9249	0,0145	0,9579
414	144	14	11,3106	1,0996	0,0167	0,0013	0,9262	0,0142	0,9391
415	145	14	11,3891	1,0996	0,0167	0,0013	0,9275	0,0139	0,9205
416	146	14	11,4677	1,0996	0,0167	0,0013	0,9288	0,0137	0,9021
417	147	14	11,5462	1,0996	0,0167	0,0013	0,9301	0,0134	0,8840
418	148	14	11,6248	1,0996	0,0167	0,0013	0,9314	0,0131	0,8661
419	149	13	11,7033	1,0211	0,0155	0,0012	0,9326	0,0129	0,8485
420	150	13	11,7819	1,0211	0,0155	0,0012	0,9338	0,0126	0,8311
421	151	13	11,8604	1,0211	0,0155	0,0012	0,9350	0,0123	0,8140
422	152	12	11,9390	0,9425	0,0143	0,0011	0,9362	0,0121	0,7971
423	153	12	12,0175	0,9425	0,0143	0,0011	0,9373	0,0118	0,7805
424	154	12	12,0961	0,9425	0,0143	0,0011	0,9384	0,0116	0,7641
425	155	12	12,1746	0,9425	0,0143	0,0011	0,9395	0,0113	0,7479
426	156	12	12,2531	0,9425	0,0143	0,0011	0,9406	0,0111	0,7320
427	157	12	12,3317	0,9425	0,0143	0,0011	0,9418	0,0109	0,7163
428	158	11	12,4102	0,8640	0,0131	0,0010	0,9428	0,0106	0,7008
429	159	11	12,4888	0,8640	0,0131	0,0010	0,9438	0,0104	0,6856
430	160	11	12,5673	0,8640	0,0131	0,0010	0,9448	0,0102	0,6707
431	161	11	12,6459	0,8640	0,0131	0,0010	0,9459	0,0099	0,6559
432	162	11	12,7244	0,8640	0,0131	0,0010	0,9469	0,0097	0,6414
433	163	11	12,8030	0,8640	0,0131	0,0010	0,9479	0,0095	0,6272
434	164	11	12,8815	0,8640	0,0131	0,0010	0,9489	0,0093	0,6131
435	165	11	12,9601	0,8640	0,0131	0,0010	0,9500	0,0091	0,5993
436	166	10	13,0386	0,7855	0,0119	0,0009	0,9509	0,0089	0,5858
437	167	10	13,1171	0,7855	0,0119	0,0009	0,9518	0,0087	0,5724
438	168	10	13,1957	0,7855	0,0119	0,0009	0,9528	0,0085	0,5593
439	169	10	13,2742	0,7855	0,0119	0,0009	0,9537	0,0083	0,5464
440	170	10	13,3528	0,7855	0,0119	0,0009	0,9546	0,0081	0,5337
441	171	10	13,4313	0,7855	0,0119	0,0009	0,9555	0,0079	0,5213
442	172	10	13,5099	0,7855	0,0119	0,0009	0,9565	0,0077	0,5091
443	173	9	13,5884	0,7069	0,0107	0,0008	0,9573	0,0075	0,4970
444	174	9	13,6670	0,7069	0,0107	0,0008	0,9582	0,0074	0,4853
445	175	9	13,7455	0,7069	0,0107	0,0008	0,9590	0,0072	0,4737
446	176	9	13,8241	0,7069	0,0107	0,0008	0,9598	0,0070	0,4623
447	177	9	13,9026	0,7069	0,0107	0,0008	0,9607	0,0068	0,4511
448	178	9	13,9811	0,7069	0,0107	0,0008	0,9615	0,0067	0,4402
449	179	9	14,0597	0,7069	0,0107	0,0008	0,9624	0,0065	0,4295
450	180	8	14,1382	0,6284	0,0095	0,0007	0,9631	0,0063	0,4189
451	181	8	14,2168	0,6284	0,0095	0,0007	0,9638	0,0062	0,4086
452	182	8	14,2953	0,6284	0,0095	0,0007	0,9646	0,0060	0,3984
453	183	8	14,3739	0,6284	0,0095	0,0007	0,9653	0,0059	0,3885
454	184	7	14,4524	0,5498	0,0083	0,0007	0,9660	0,0057	0,3788
455	185	7	14,5310	0,5498	0,0083	0,0007	0,9666	0,0056	0,3692
456	186	7	14,6095	0,5498	0,0083	0,0007	0,9673	0,0055	0,3599
457	187	7	14,6881	0,5498	0,0083	0,0007	0,9679	0,0053	0,3507

458	188	7	14,7666	0,5498	0,0083	0,0007	0,9686	0,0052	0,3417
459	189	7	14,8452	0,5498	0,0083	0,0007	0,9692	0,0050	0,3329
460	190	7	14,9237	0,5498	0,0083	0,0007	0,9699	0,0049	0,3243
461	191	7	15,0022	0,5498	0,0083	0,0007	0,9706	0,0048	0,3158
462	192	7	15,0808	0,5498	0,0083	0,0007	0,9712	0,0047	0,3076
463	193	7	15,1593	0,5498	0,0083	0,0007	0,9719	0,0045	0,2995
464	194	7	15,2379	0,5498	0,0083	0,0007	0,9725	0,0044	0,2916
465	195	7	15,3164	0,5498	0,0083	0,0007	0,9732	0,0043	0,2838
466	196	7	15,3950	0,5498	0,0083	0,0007	0,9738	0,0042	0,2763
467	197	7	15,4735	0,5498	0,0083	0,0007	0,9745	0,0041	0,2688
468	198	6	15,5521	0,4713	0,0071	0,0006	0,9750	0,0040	0,2616
469	199	6	15,6306	0,4713	0,0071	0,0006	0,9756	0,0039	0,2545
470	200	6	15,7092	0,4713	0,0071	0,0006	0,9761	0,0038	0,2476
471	201	6	15,7877	0,4713	0,0071	0,0006	0,9767	0,0036	0,2408
472	202	6	15,8662	0,4713	0,0071	0,0006	0,9773	0,0035	0,2342
473	203	6	15,9448	0,4713	0,0071	0,0006	0,9778	0,0035	0,2277
474	204	6	16,0233	0,4713	0,0071	0,0006	0,9784	0,0034	0,2214
475	205	6	16,1019	0,4713	0,0071	0,0006	0,9789	0,0033	0,2152
476	206	6	16,1804	0,4713	0,0071	0,0006	0,9795	0,0032	0,2092
477	207	5	16,2590	0,3927	0,0060	0,0005	0,9800	0,0031	0,2033
478	208	5	16,3375	0,3927	0,0060	0,0005	0,9804	0,0030	0,1975
479	209	5	16,4161	0,3927	0,0060	0,0005	0,9809	0,0029	0,1919
480	210	5	16,4946	0,3927	0,0060	0,0005	0,9814	0,0028	0,1864
481	211	5	16,5732	0,3927	0,0060	0,0005	0,9818	0,0027	0,1811
482	212	5	16,6517	0,3927	0,0060	0,0005	0,9823	0,0027	0,1758
483	213	5	16,7303	0,3927	0,0060	0,0005	0,9828	0,0026	0,1707
484	214	5	16,8088	0,3927	0,0060	0,0005	0,9832	0,0025	0,1658
485	215	5	16,8873	0,3927	0,0060	0,0005	0,9837	0,0024	0,1609
486	216	5	16,9659	0,3927	0,0060	0,0005	0,9842	0,0024	0,1562
487	217	5	17,0444	0,3927	0,0060	0,0005	0,9846	0,0023	0,1516
488	218	5	17,1230	0,3927	0,0060	0,0005	0,9851	0,0022	0,1471
489	219	5	17,2015	0,3927	0,0060	0,0005	0,9856	0,0022	0,1427
490	220	5	17,2801	0,3927	0,0060	0,0005	0,9860	0,0021	0,1384
491	221	4	17,3586	0,3142	0,0048	0,0004	0,9864	0,0020	0,1343
492	222	4	17,4372	0,3142	0,0048	0,0004	0,9868	0,0020	0,1302
493	223	4	17,5157	0,3142	0,0048	0,0004	0,9871	0,0019	0,1263
494	224	4	17,5943	0,3142	0,0048	0,0004	0,9875	0,0019	0,1224
495	225	4	17,6728	0,3142	0,0048	0,0004	0,9879	0,0018	0,1187
496	226	4	17,7513	0,3142	0,0048	0,0004	0,9883	0,0017	0,1150
497	227	4	17,8299	0,3142	0,0048	0,0004	0,9886	0,0017	0,1115
498	228	4	17,9084	0,3142	0,0048	0,0004	0,9890	0,0016	0,1080
499	229	4	17,9870	0,3142	0,0048	0,0004	0,9894	0,0016	0,1047
500	230	4	18,0655	0,3142	0,0048	0,0004	0,9897	0,0015	0,1014
501	231	4	18,1441	0,3142	0,0048	0,0004	0,9901	0,0015	0,0982
502	232	4	18,2226	0,3142	0,0048	0,0004	0,9905	0,0014	0,0951
503	233	4	18,3012	0,3142	0,0048	0,0004	0,9909	0,0014	0,0921

504	234	3	18,3797	0,2356	0,0036	0,0003	0,9911	0,0014	0,0892
505	235	3	18,4583	0,2356	0,0036	0,0003	0,9914	0,0013	0,0863
506	236	4	18,5368	0,3142	0,0048	0,0004	0,9918	0,0013	0,0836
507	237	3	18,6154	0,2356	0,0036	0,0003	0,9921	0,0012	0,0809
508	238	3	18,6939	0,2356	0,0036	0,0003	0,9924	0,0012	0,0782
509	239	4	18,7724	0,3142	0,0048	0,0004	0,9927	0,0011	0,0757
510	240	4	18,8510	0,3142	0,0048	0,0004	0,9931	0,0011	0,0732
511	241	4	18,9295	0,3142	0,0048	0,0004	0,9935	0,0011	0,0708
512	242	3	19,0081	0,2356	0,0036	0,0003	0,9938	0,0010	0,0685
513	243	3	19,0866	0,2356	0,0036	0,0003	0,9940	0,0010	0,0663
514	244	3	19,1652	0,2356	0,0036	0,0003	0,9943	0,0010	0,0641
515	245	3	19,2437	0,2356	0,0036	0,0003	0,9946	0,0009	0,0619
516	246	2	19,3223	0,1571	0,0024	0,0002	0,9948	0,0009	0,0599
517	247	2	19,4008	0,1571	0,0024	0,0002	0,9950	0,0009	0,0578
518	248	4	19,4794	0,3142	0,0048	0,0004	0,9953	0,0008	0,0559
519	249	3	19,5579	0,2356	0,0036	0,0003	0,9956	0,0008	0,0540
520	250	3	19,6364	0,2356	0,0036	0,0003	0,9959	0,0008	0,0522
521	251	3	19,7150	0,2356	0,0036	0,0003	0,9962	0,0008	0,0504
522	252	3	19,7935	0,2356	0,0036	0,0003	0,9965	0,0007	0,0487
523	253	3	19,8721	0,2356	0,0036	0,0003	0,9967	0,0007	0,0470
524	254	2	19,9506	0,1571	0,0024	0,0002	0,9969	0,0007	0,0454
525	255	2	20,0292	0,1571	0,0024	0,0002	0,9971	0,0007	0,0438
526	256	2	20,1077	0,1571	0,0024	0,0002	0,9973	0,0006	0,0423
527	257	2	20,1863	0,1571	0,0024	0,0002	0,9975	0,0006	0,0408
528	258	2	20,2648	0,1571	0,0024	0,0002	0,9977	0,0006	0,0394
529	259	3	20,3434	0,2356	0,0036	0,0003	0,9979	0,0006	0,0380
530	260	3	20,4219	0,2356	0,0036	0,0003	0,9982	0,0006	0,0367
531	261	2	20,5004	0,1571	0,0024	0,0002	0,9984	0,0005	0,0354
532	262	2	20,5790	0,1571	0,0024	0,0002	0,9986	0,0005	0,0341
533	263	2	20,6575	0,1571	0,0024	0,0002	0,9988	0,0005	0,0329
534	264	2	20,7361	0,1571	0,0024	0,0002	0,9990	0,0005	0,0317
535	265	2	20,8146	0,1571	0,0024	0,0002	0,9992	0,0005	0,0306
536	266	2	20,8932	0,1571	0,0024	0,0002	0,9993	0,0004	0,0295
537	267	2	20,9717	0,1571	0,0024	0,0002	0,9995	0,0004	0,0284
538	268	2	21,0503	0,1571	0,0024	0,0002	0,9997	0,0004	0,0274
539	269	2	21,1288	0,1571	0,0024	0,0002	0,9999	0,0004	0,0264
SU		10731		842,8748	12,7708				

Tabla 5: De izquierda a derecha, por colores: (naranja) coordenadas puntos sobre papel milimetrado; (azul claro) coordenadas en dimensiones reales; (azul oscuro) frecuencias relativa y absoluta; (verde) coordenadas teóricas en unidades reales.

1.3. OPTIMIZACIÓN

		Proyección 1	Proyección 2	Proyección 3
Material		Alúmina Titanio	Níquel Aluminio	Alúmina Titanio
Aditivo		1% Grafeno	-	1% Grafeno
Azulejo		nº 8	nº11	nº 21
Masa polvo	Inicial	50,000	50,000	22,962
	Final	22,962	47,785	20,289
Masa azulejo	Inicial	217,013	212,596	219,966
	Final	220,446	213,043	220,027
Masa empleada		27,038	2,215	2,673
Masa adherida		3,433	0,447	0,061
% masa adherida		12,70	20,18	2,28
Tiempo total		116	12,700	15,510
Tiempo sin material		8,3	2,000	3,200
t (s)		107,7	10,7	12,31
M (g/s)		0,251	0,207	0,217
Tpr sustrato	Dentro	83	8,300	9,930
	Extremos	25,7	2,400	2,380

Tabla 6: Datos experimentales de ensayos de trayectoria.

2. CÁLCULOS

En este anexo se presentan las diferentes ecuaciones aplicadas y cálculos desarrollados para obtener los resultados que se han presentado en el documento:

2.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En primer lugar, la fórmula empleada para calcular el porcentaje de aditivo de la mezcla (en este caso grafeno) es la siguiente:

$$\% \text{ grafeno} = \frac{m_{\text{grafeno}}}{m_{\text{proyectada}}} \times 100 = \frac{m_{\text{grafeno}}}{m_{\text{aleación}} + m_{\text{grafeno}}} \times 100$$

En cuanto a la tasa de deposición, se corresponde con:

$$Tasa_deposición = \frac{m_{\text{depositada}}}{m_{\text{proyectada}}} = \frac{m_{f_{AZ}} - m_{0_{AZ}}}{m_{\text{proyectada}}}$$

2.2. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN

La fórmula de la función de densidad de la distribución normal $N(\mu, \sigma)$ univariante es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde: $\mu (\in \mathbb{R})$ es la media (también puede ser la mediana, la moda o el valor esperado, según aplique), $\sigma (> 0)$ es la desviación estándar (o típica), y σ^2 es la varianza. En la siguiente imagen se muestra representada dicha función para distintos valores de media y desviación típica:

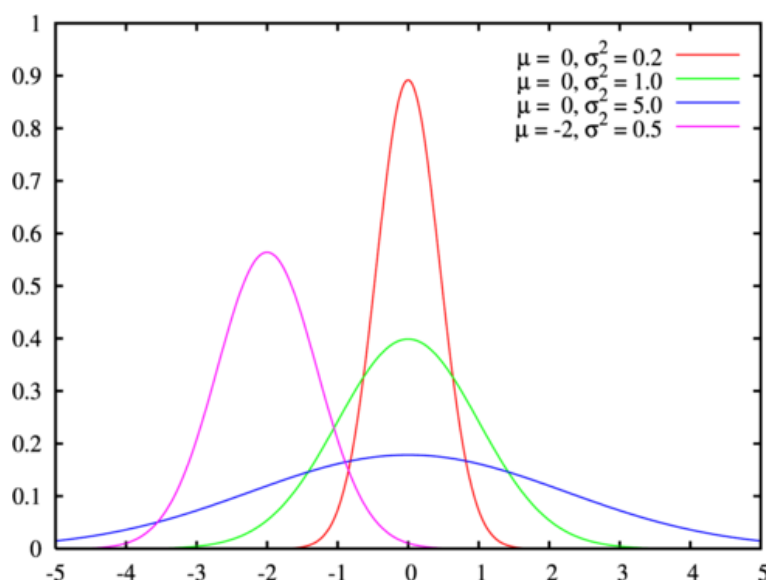


Figura 69: Distribución normal para distintos valores de media y desviación típica.

Siguiendo con el caso de la distribución univariante, han sido necesarias el cálculo de las frecuencias relativa y absoluta acumulada para la determinación de la desviación típica experimental. Los valores de la primera se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$f_i = \frac{n_i}{N}$$

Mientras que la frecuencia absoluta acumulada, se calcula de la siguiente manera:

$$F_i = n_1 + n_2 + \dots + n_i$$

La cual permite obtener el valor de la desviación típica, ya que, (considerando la media nula) $P(-3\sigma \leq X \leq 3\sigma) \approx 0,9973$; por tanto:

$$\sigma = x(F_{i=0,9973})/3$$

En el caso de tratar la muestra como superficie tridimensional para calcular el volumen de material bajo la misma, se emplea la función de distribución bivariante, que se representa mediante la siguiente ecuación:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]}$$

Además de los términos ya presentados para la ecuación anterior, en esta aparece el coeficiente de correlación lineal de (x,y), ρ , así como los expected values de x e y ($\mu_x = E[x]$ y $\mu_y = E[y]$, respectivamemnte).

Dado que tiene una cierta complejidad y se considera que no es oportuno tal nivel de detalle para las muestras que se ha generado, en cierto modo, de forma algo imprecisa dado que es un proceso manual, la ecuación anterior se puede simplificar teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- las desviaciones típicas en ambos ejes pueden ser consideradas iguales (dada la corta distancia entre el soplete y el sustrato, la alta velocidad y el escaso peso de las partículas no se aprecia una modificación en la trayectoria de las mismas debido a la gravedad), de tal forma que $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$;
- posicionando el eje de coordenadas en el centro de la proyección ambas medias pueden ser consideradas nulas;
- y, como consecuencia de las dos primeras, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 0$. Por tanto, la ecuación toma la siguiente forma:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma} \times e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma}\right)^2\right]}$$

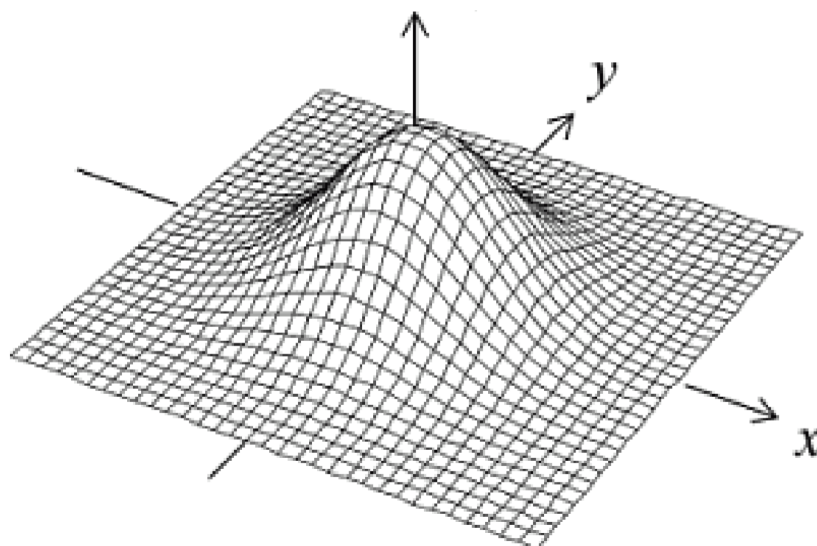


Figura 70: Representación de una normal bivalente con medias nulas y desviaciones típicas iguales en ambos ejes.

2.3. COMPROBACIÓN DE LA MASA

Para corroborar que los modelos teóricos se aproximan de forma precisa a lo producido de forma experimental, se deben comparar valores entre ambos. La forma más sencilla de hacerlo se considera que es comparando las masas de proyección, para lo cual, de forma experimental se emplea la fórmula presentada en el apartado 3.1 de este anexo, y para el cálculo teórico se usan las dos siguientes ecuaciones:

En primer lugar, se debe calcular el volumen bajo la superficie descrita por la normal bivalente anteriormente presentada para unos determinados valores de desviación típica (y una media distinta de cero):

$$Volumen (mm^3) = \int_{-\mu}^{\mu} \left(\int_{-\mu}^{\mu} \frac{1}{2\pi\sigma} \times e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 + \left(\frac{y-\mu}{\sigma} \right)^2 \right]} dx \right) dy$$

Y, en segundo lugar, como la densidad de los distintos materiales de la mezcla proyectada es conocida, se calcula la masa adherida de la muestra de la siguiente forma:

$$Masa_{ad} = \frac{\rho_{aleación} \times m_{aleación} + \rho_{grafeno} \times m_{grafeno}}{m_{aleación} + m_{grafeno}} \times Volumen$$

Por último, el error relativo entre la magnitud pesada (m_{exp}) con la báscula de precisión y la obtenida de forma teórica (m_{teo}) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{masa}(\%) = \frac{|m_{exp} - m_{teo}|}{m_{exp}} \times 100$$

2.4. CÁLCULO VOLUMEN DEPOSITADO

En primer lugar, para tener una referencia del grosor del revestimiento, se calcula el grosor medio del recubrimiento experimental de la siguiente forma:

$$e = \frac{Masa_{ad}}{densidad \times lado^2}$$

Y, tal como se ha expuesto, una opción es caracterizar el revestimiento teórico de tal forma que este espesor medio experimental se un determinado porcentaje del valor pico que se desea obtener en la simulación (para los ejemplos calculados se ha usado un factor de 0,9). Posteriormente, se puede definir el valor del grosor en el valle como un porcentaje del valor de altura pico. El valor de estos porcentajes se puede adaptar en función de las exigencias de cada proyección.

$$0,9 \times hpico = e$$

$$0,8 \times hpico = hvalle$$

También se puede aplicar, como se ha hecho en los casos de ejemplo, una condición para establecer el grosor mínimo en los extremos del sustrato (lo cual también influye al determinar la distancia entre pasadas).

Para calcular el volumen teórico de material que se va a requerir para recubrir todo un sustrato, en este caso, para un azulejo, basta con multiplicar el área bajo el perfil de distribución normal para una desviación típica (del cual conocemos el valor pico gracias a las condiciones que hemos aplicado, las cuales han sido descritas anteriormente) y la distancia que recorre el soplete:

$$Volumen_{pextr} = 2 \times lado \times \int_{-td}^{5\sigma} hpico \times e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right]} dx$$

Mediante la ecuación anterior se calcula el volumen de material que ha sido depositado en la primera y última pasada (pasadas de los extremos para el caso del azulejo cuadrado). Y la siguiente hace referencia al volumen depositado mediante el resto de pasadas.

$$Volumen_{pint} = (pasdas - 2) \times lado \times \int_{-5\sigma}^{5\sigma} hpico \times e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right]} dx$$

El volumen total se calcula como la suma del volumen depositados en todas las pasadas:

$$Volumen = Volumen_{pextr} + Volumen_{pint}$$

Para calcular el material perdido, además de aquel que no queda adherido como consecuencia de que la tasa de adhesión no es del 100%, se calcula el volumen correspondiente a las pasadas de los extremos que queda fuera del sustrato

(cabe recordar que en este aspecto se considera ideal el inicio y final de una misma pasada, ya que se considera que no hay pérdidas). Se identifica como “td” la distancia entre el eje que recorre el soplete para hacer la pasada y el extremo del sustrato:

$$Volumen_perd = 2 \times lado \times \int_{-5\sigma}^{-td} hpico \times e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} dx$$

Es necesario comprar la simulación teórica con los datos experimentales en cuanto a la masa total requerida (para realizar el “mismo” recubrimiento). Se toma como referencia, aunque no es exactamente igual, a modo de aproximación, la tasa de deposición del ensayo puntual correspondiente. De esta forma, la masa total requerida para la proyección teórica es:

$$m_{teórica_total} = \left(\frac{Volumen}{tasa_deposición} + Volumen_perd \right) \times densidad$$

Para concluir, se compara este valor con la misma magnitud experimental para comprobar si existe un ahorro de material que determina, mediante la siguiente ecuación, la efectividad del proceso de optimización:

$$\eta (\%) = \frac{m_{proyectada} - m_{teórica_total}}{m_{proyectada}} \times 100$$

Además, si queremos obtener el valor de este ahorro en términos económicos (sin tener en cuenta el coste del tiempo de trabajo del técnico encargado que previsiblemente disminuirá), simplemente debemos multiplicar la cantidad de material que se ha dejado de necesitar por el valor de mercado de la misma:

$$-\Delta\epsilon = (m_{proyectada} - m_{teórica_total}) \times coste(\epsilon/g)$$

En este caso, la ecuación anterior no ha sido empleada ya que las cantidades de material utilizadas para los ensayos de trayectoria han sido muy pequeñas y

se da una mejor visión de la efectividad de método si se trata en términos de ahorro porcentuales que en términos económicos.

3. CÓDIGO

Durante el desarrollo del proyecto, principalmente han sido llevadas a cabo mediante el software de computación MATLAB (en lenguaje de programación propio, .m, y haciendo uso de las *toolbox* de análisis de datos y reconocimiento de imágenes) dos tareas bien diferenciadas que se exponen y explican a continuación.

3.1. CÁLCULO DE MASAS PROYECTADAS

A grandes rasgos, la función de las líneas de código que se presentan a continuación es leer una fotografía del perfil obtenido experimentalmente, convertirla en una matriz de arrays, identificar qué píxeles se corresponden con el cúmulo de material proyectado, calcular la desviación típica de dicha distribución, obtener la superficie teórica de normal 0 y mismas desviaciones típicas para los ejes x e y, y a partir de ella calcular el volumen bajo dicha superficie que multiplicado por la masa (que es conocida) da la masa proyectada.

En el propio código se han añadido comentarios para facilitar su comprensión:

```
clc; close all; clear all;
[A]=imread('AZ17.jpeg'); %Se lee la imagen citada como una
matriz en la que cada posición está conformada por un
vector de 3 valores, correspondiente al código de color

[fil,col,~]=size(A); %Se definen dos variables con el
número de filas y columnas de la matriz [A] (determinado
por el tamaño en píxeles de la foto introducida)
```

```

criterio=30; %Se establece un criterio para diferenciar el
cambio de color en la imagen (la media de los valores del
código de color, que varia para ajustar cada muestra)
paso=20; %Distancia que se establece entre los puntos
experimentales
eje=56; %Dimensiones reales de los ejes de la huella en el
plano horizontal de la muestra
mu=eje/2; %Media de la distribución experimental
fc=eje/col; %Factor de conversión píxeles-->medidas reales
densidad=4.9; %Densidad del material proyectado

x=[1:paso:col]; %En el eje x se muestran tanto valores como
col/paso
altura=zeros(1,ceil(col/paso)); %Se crea una matriz
(vector) de 1xn dimensiones de ceros (para evitar un
posible error posterior)
c=0; %Se reinicia el contador i/paso
for i=1:paso:col %Se recorre la imagen en dirección
horizontal desde 1 hasta col
    c=c+1; %Se incrementa el contador
    for j=1:fil %Se recorre la imagen en sentido vertical
        color(j)=mean(A(j,i,:)); %Se busca la media del
código de color para cada píxel (diferenciar montículo y
fondo)
        if color(j)>criterio %Cuando se detecta el cambio
de color
            altura(c)=fil-j; %Se establece la altura para
ese punto
            break; %Y se pasa al siguiente punto (situado a
una distancia de este = paso)
        end
    end
end
end

```

```

    suma_altura(c)=sum(altura(1:c)); s%Suma las alturas del
intervalo --> calcular frecuencia acumulada
end
total=suma_altura(end); %Cuando se has sumado todas se
guarda el valor en la variable "total"

condicion=1; %Se activa una condición
for i=1:c
    if suma_altura(i)/total>0.9973 && condicion==1 %Cuando
la suma de las alturas llega al 99,73% del total, la
coordenada horizontal se corresponde con el valor de
3*desviación estándar
        sigmax=(x(i)-mean(x))/3; %Se calcula la desviación
estandar (figura 42)
        condicion=0; %Se desactiva la condición
    end
end

media=mean(x); %La media de la distribución es la media de
los valores del eje horizontal: x=x-media;
X=[x(1):0.01:x(end)];
Y=max(altura)*exp(-(x-media).^2/2/sigmax.^2); %Función de
distribución normal en unidades de píxeles
funbi=@(x,y) max(altura)*fc^2*exp(-0.5*((x-
mu)/sigmax.*fc).^2+((y-mu)/sigmax.*fc).^2)); %Función de la
distribución normal bivalente tomando la misma desviación
típica para ambos ejes
xmin=-mu; %Límites integración: para ambos ejes entre -mu y
+mu
xmax=mu;
ymin=xmin;
ymax=xmax;

```

```
volumen_mm=integral2(funbi,xmin,xmax,ymin,ymax); %Volumen
bajo la superficie de la normal bivariante
masa=densidad/1000*volumen_mm; %Conversión a gramos

fprintf('La desviación estándar es: %g mm.\n',sigma*fc)
%Output de los valores relevantes
fprintf('Volumen en mm es: %g mm^3.\n',volumen_mm)
fprintf('Masa en g es: %g g.\n',masa)

stem(x*fc,altura*fc); %Representación gráfica comparativa
title('PERFIL EXPERIMENTAL vs TEÓRICO');
hold on; % x2=[x(end)/2:paso:3/2*x(end)];
plot(x*fc,Y*fc)
```

3.2. OPTIMIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA

En este caso, se muestra el código desarrollado para calcular la trayectoria (distancia entre pasadas) que minimiza el uso de material para una determinada condición de tolerancia respecto al grosor del revestimiento.

```
close all; clear all;
lado=12.3;
altura=12.3; %Dimensiones sustrato
dx=0.1; %Paso en coordenadas x
dy=12.3; %Paso en coordenadas y (para la simulación
gráfica)
e=0.024; %Espesor medio del revestimiento experimental
sigma=0.64; %Desviación típica
f1=@(xf1,muf1,sigmaf1) e*(exp(-(xf1-
muf1).^2/(2*sigmaf1^2))); %Función de distribución

%% Sacar las constantes numéricas
porcentaje=0.8;%Relación entre máximo y el extremo

xeval=[-15:0.01:15];%Recorrer eje x
```

```

feval=f1(xeval,0,sigma);%Recorre la altura en función
de la posición y la desviación típica

[hmax]=max(feval);%Devuelve valor máximo del rango
xeval (es un valor conocido)
hmed=0.8*hmax;%Condición implícita de distancia mínima
entre pasadas (para que la suma de dos pasadas
contiguas no superen el valor pico de las mismas)
hmin=porcentaje*hmax;%Condición externa de distancia
al valor pico
hminint=porcentaje/2*hmax;%Condición implícita de
distancia máxima entre pasadas

[~,phmed]=min((feval-hmed).^2);%Se busca el índice que
se corresponde con el valor buscado: hmedios; aplicar
este índice en el vector xeval da la distancia real
[~,phminint]=min((feval-hminint).^2);%Procedimiento
análogo para minint
[~,phmin]=min((feval-hmin).^2);%Procedimiento análogo
para min

td=abs(xeval(phmin));%Como feval está centrado en 0,
el valor del vectorn con el índice calculado es
directamente la distancia hasta la coordenada
horizontal de pico

dmin=2*abs(xeval(phmed));%La distancia entre picos, al
ser simétrico, es el doble de la distancia a un pico
dmax=2*abs(xeval(phminint));

def=altura-2*td;%Distancia entre los picos exteriores
del sustrato

pasadas=ceil(def/dmax);%El número de pasadas se
corresponde con el entero superior al cociente entre
def y distancia de pasada máxima
d=def/pasadas;%Distancia entre pasadas

f=@(x) e*(exp(-(x).^2/(2*sigma^2))); %Función de
distribución
densidad=3.99; %Densidad del material proyectado
area_pasada_extremo=integral(f,-td,3); %Área bajo las
curvas en los extremos
area_pasada_centro=integral(f,-3,3); %Área bajo las
distribuciones normales centrales

```

```

volumen=2*lado*area_pasada_extremo+(pasadas-
2)*lado*area_pasada_centro; %Volumen total de material
sobre el sustrato
masa=volumen*densidad; %Masa adherida

area_out=integral(f,-5*sigma,-td); %Área de las curvas
externas que queda fuera del sustrato
volumen_out=2*lado*area_out; %Volumen perdido por los
lados
masa_out=volumen_out*densidad; %Masa perdida por los
lados

tasa=0.164;%Tasa de deposición
masa_total=masa/tasa+masa_out;%Masa total

mejora=100-(masa_total*100/2.673);%Porcentaje de
material ahorrado

%Devolución de los valores de masa
fprintf('Masa adherida: %g g.\n',masa);
fprintf('Masa perdida en los extremos: %g
g.\n',masa_out);
fprintf('Masa total requerida: %g g.\n',masa_total);
fprintf('Se consigue un ahorro en material del %g por
ciento.\n',mejora);
tramos=pasadas+1;
%Devolución del valor de las variables clave para
determinar la trayectoria
fprintf('El número de pasadas debe de ser: %g
.\n',tramos);
fprintf('Distancia entre la primera y el extremo del
substrato: %g mm.\n',d);
fprintf('Distancia entre pasadas sucesivas: %g
mm.\n',def);

% Recorrido ejes
x=[0:dx:altura];
y=[0:dy:lado];

Z=zeros(length(x),length(y));%Se define el tamaño de
la matriz de ceros

numero=length(y); %Transformación para determinar la
distancia
close all;

```

```

muini=td; %Media correspondiente a la distribución
normal de la primera pasada

hazulejo=0.7;%Grosor sustrato
cazulejo=[0.8 0.7 0.8];%Color sustrato
base=[-hazulejo -hazulejo -hazulejo -
hazulejo];%Geometría sustrato
patch([0 0 altura altura],[0 lado lado 0],[0 0 0
0],cazulejo);%Cara superior sustrato
patch([0 0 altura altura],[0 lado lado
0],base,cazulejo);%Cara inferior sustrato

cara=[0 0 -hazulejo -hazulejo];%Caras sustrato
patch([0 0 0 0],[0 lado lado
0],cara,cazulejo);%Definición gráfica sustrato
patch(ones(1,4)*altura,[0 lado lado 0],cara,cazulejo);
patch([0 altura altura 0],[0 0 0 0],cara,cazulejo);
patch([0 altura altura
0],ones(1,4)*lado,cara,cazulejo);
view(30,60)%Se define el ángulo de visión

for j=0:pasadas %Contador pasadas

    mu=muini+j*d; %La media de cada distribución es
igual a la inicial más la distancia desde la primera
hasta la misma
    for i=1:numero %Adiciones en profundidad
        Z(:,i)=Z(:,i)+transpose(f1(x,mu,sigma)); %Se
le suma a la matriz previa los valores de la
distribución de cada pasada
        hold on;%Representaciónb gráfica sobre el
sustrato definido

[Y,X]=meshgrid([0,y(1:i),y(i),y(i+1:end)], [0,x,x(end) ]
);%Espacio para representación gráfica (únicamente
sobre el sustrato)

Zrep=[zeros(length(x),1),Z,zeros(length(x),1)];%Repres
entación para cerrar los extremos
[~,a]=size(Zrep); %Se define el tamaño de la
matriz vector
Zrep=[zeros(1,a);Zrep;zeros(1,a)];

```



```
        d1=surf(X,Y,Zrep,'EdgeColor','None'); %Se
plotean las funciones
        pause(1)
        view([30,60])%Se define el ángulo de visión
    end
end
```


4. CATÁLOGOS

4.1. CASTODYN DS 8000

CastoDyn® DS 8000

Sistema avanzado de recubrimiento fácil de utilizar.



- Gran capacidad de adaptación: Concepto modular permite la más amplia gama Aplicaciones MicroFlo®.
- Fácil de usar: Control de parámetros de una sola válvula.
- Ligero : Apto para todos los usuarios, desde pequeños talleres hasta grandes fábricas.



Castolin Eutectic®
Eutectic Castolin

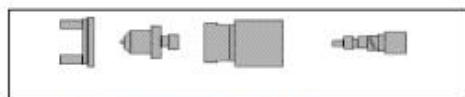
EL DS8000 - DISEÑADO PARA UN FUNCIONAMIENTO SENCILLO

Los usuarios apreciarán el diseño ergonómico del DS 8000. Su poco peso (casi un 40% menos que las antorchas que existen en el mercado) no se necesitan herramientas para montarlo y desmontarlo.

El DS 8000 no requiere habilidades especiales para operarlo. El único control ajustable es la válvula utilizada para establecer el flujo de acetileno; otros controles son simples interruptores (on / off). Cuenta con una palanca de cierre rápido que ofrece una seguridad mejorada y permite a la antorcha encenderse nuevamente sin tener que tocar ningún otro control.



LA CONSTRUCCIÓN MODULAR AUMENTA LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO



Módulo "Standard Spray" (SSM)

Debido a que las familias de polvo MicroFlo varían considerablemente en sus características, cuatro módulos estándar (SSM), se han desarrollado para el DS 8000. Cada SSM está optimizado para obtener recubrimientos de alta calidad a partir de un grupo particular de polvos Eutectic MicroFlo. Entre ellos, los cuatro SSM permiten el DS 8000 para dar excelentes resultados a través de una gama completa de aplicaciones de recubrimiento MicroFlo.

DESEMPEÑO PREDECIBLE Y FIABLE

El DS 8000 está construido con componentes mecanizados de precisión CNC, que ofrecen una mayor fiabilidad. Orificios calibrados cuidadosamente perforados a través de rubíes sintéticos dan caudales muy precisos, la producción de los recubrimientos es extremadamente precisa y consistente .



DS 8000 CNC componentes construidos para una excelente precisión

AUTOMATIZADO PARA APLICACIONES MÁS GRANDES

Los usuarios industriales pueden combinar fácilmente el DS 8000 con diversos sistemas de automatización, y de esta forma su potencia y precisión podrá ser explotada al máximo, incluso en las más grandes aplicaciones, reparación o mantenimiento preventivo. (Un alimentador de polvo externo se puede conectar para apoyar las operaciones de recubrimiento continuo).



Para trabajos más grandes, agregue un alimentador de polvo externo

POLVOS MICROFLO Y RECUBRIMIENTOS ANTI-DESGASTE EUTECTIC.

Hay un polvo MicroFlo diseñado para proporcionar la solución óptima para prácticamente todas las aplicaciones de recubrimiento. Con sus cuatro módulos de pulverización estándar, el DS 8000 puede proyectar todos los polvos en las familias de productos MicroFlo.

Serie 23000 (SSM 20)

Serie 23000 se proyecta para formar un depósito que se calienta para fundir sus partículas constituyentes. Esto produce una capa densa con una fuerte unión por difusión de metal con el metal base, dando a la Serie 23000 una buena resistencia a la fricción de alta presión y alta temperatura de oxidación. La familia de la serie 23000 también proporciona protección frente a otras formas de desgaste.

Serie 29000 (SSM 10)

El DS 8000 es un proceso de "proyección en frío", por lo que se puede utilizar en los casos en que no hay distorsión o cambio de estructura metálica, en el material de base se puede tolerar. Serie 29.000, aplicados sobre una capa de unión, son fáciles de mecanizar al acabado deseado y tienen buenas propiedades de auto-lubricación. Aplicación principal de la familia es la protección contra la fricción, a pesar de los distintos productos de la serie 29000 también ofrecen buena resistencia a otras formas de desgaste.

CastoDyn DS 8000



Proxon® 21000 (SSM 10)

Polvos Proxon también se proyectan en "frío", pero a diferencia de la serie 29000, estos productos no requieren capa de unión y así pueden dar recubrimientos más delgados. Este procedimiento de "un solo paso" hace que el rango Proxon sea simple y rápido de aplicar. Uso principal de Proxon está en contra de la fricción de alta velocidad, mientras que su depósito homogéneo también ofrece una mejor protección contra los tipos de partículas de corrosión.

Polimeros EverTuff® (SSM 40)

Proceso de DS 8000, permite todo tipo de materiales de base, concreto, ladrillo, piedra y vidrio, así como de metal, que va a recubrirse con polimeros termoplásticos. Proporcionan una excelente protección contra todo tipo de corrosión, recubrimientos, etc. EverTuff también bloquean la luz ultravioleta y están disponibles en una amplia variedad de colores.

MetaCeram® 25000 (SSM 30)

El DS 8000 ofrece una alternativa económica al sistema de pulverización para la aplicación de polvos MetaCeram. Estos contienen materiales cerámicos inertes o metales y se adaptan para aplicaciones particulares. Ellos pueden ser pulidos al final y ofrece una muy suave protección contra la intensa fricción abrasiva, temperaturas muy altas, vidrio fundido y los gases de combustión.

MetaCeram® 29000 / LT (SSM 40)

MetaCeram polvos 29000 / LT se caracterizan por una temperatura de punto de fusión bajo. Los polvos seleccionados cumplen tres áreas principales de aplicación: como son (anódica) recubrimiento de sacrificio capaz de proteger de hierro y aleaciones de hierro metales básicos de la corrosión atmosférica, como un recubrimiento de aleación de aluminio mecanizable por parte de restauración y como recubrimiento para sustituir a las aleaciones de estaño.

KIT DS 8000 Y ACCESSORIOS

(Part No. 8000CDS)

El kit DS 8000 consiste en un estuche de aluminio que contiene una antorcha DS 8000 y todos los elementos auxiliares necesarios para ponerla en marcha y operar de forma segura. Para ampliar su gama de aplicaciones, el sistema 8000 DS cuenta con una serie de accesorios opcionales:

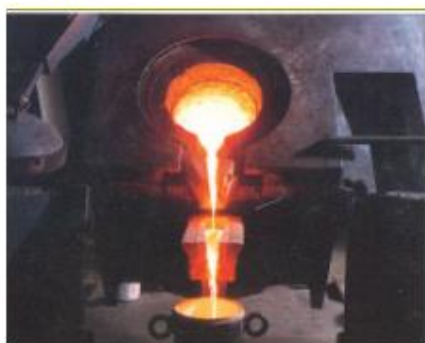
- Un cuello de extensión para el recubrimiento de superficies internas
- Una antorcha de fusión
- Lanza SF; fusión simultánea para alta velocidad de depósito con un excelente rendimiento. Para utilizar con polvos Eutalloy SF SOLAMENTE.
- Manguera de gas con las unidades de conexión rápida
- Un control de aire comprimido



TECNOLOGÍA MICROFLO - EN RESPUESTA A TODAS NECESIDADES

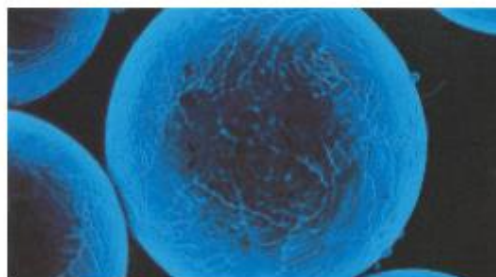
Basándose en su experiencia sin igual en recubrimientos de mantenimiento y reparación de protección, Eutectic ha desarrollado su extensa gama de polvos MicroFlo, que se puede modificar rápidamente para producir una solución más efectiva para un requisito en particular. El creciente número de industrias que utilizan esta tecnología avanzada para una variedad cada vez mayor de puestos de trabajo se basa en la eficacia del enfoque "a la medida"

Aleación fundida se vierte en la cámara de gas de atomización. Hacer nuestros propios polvos asegura la calidad necesaria para el mejor desempeño del recubrimiento.



ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD TOTAL

El aseguramiento de la calidad comienza con la cuidadosa selección de materias primas adecuadas y continúa durante todo el proceso de fabricación MicroFlo. Inspección en línea se lleva a cabo en todas las etapas desde la recepción hasta el envasado final.



Vista ampliada 450 veces, las partículas de polvos Eutectic tienen características específicas adaptadas a la aplicación prevista.

SU RECURSO PARA LA PROTECCIÓN, REPARACIÓN Y UNIÓN DE SOLUCIONES



Entra a la página oficial de Eutectic
y descarga la aplicación



que Eutectic tiene para ti.



CDS8000 12-01-09 © 2008, Eutectic Corporation, ©

Eutectic Mexico: KM 36.5 Autopista, Mexico-Querétaro 54730 Cautlán-Jzcall
Estado de Mexico, Mexico
Teléfono: 01(52) 55-5872-1111
www.eutectic.com.mx

4.2. ALÚMINA-TITANIO


METACERAM®
28030
Aleación Anti-Desgaste Microflo®

Descripción

Aleación multi-pulverizada de proyección en frío mediante procedimiento CASTODYN DS 8.000 para revestimientos de protección sobre aceros, sus aleaciones y otros materiales industriales. Sin deformaciones ni cambios en la estructura de base.

- REVESTIMIENTOS RESISTENTES AL DESGASTE.
- DEPÓSITO DENSO RESISTENTE A LA ABRASIÓN.
- BUENAS CARACTERÍSTICAS DE ROZAMIENTO.

Características del depósito

- Estructura compacta, laminar y fuerza de cohesión elevada.
- Excelente resistencia a la corrosión y al desgaste.
- Depósito denso y resistente con buenas características de rozamiento.

Aplicaciones principales

La combinación específica de una alta resistencia al desgaste, de un bajo coeficiente de rozamiento y de una dureza muy elevada, hacen de METACERAM 28030 un producto particularmente indicado para los revestimientos de protección de:

- Casquillos de bombas.
- Guía hilos.
- Cuerpos de bombas.
- Rodillos de arrastre.
- Rodillos transportadores de productos plásticos.
- Rodillos transportadores de papel.

Técnicas de utilización

Las superficies a revestir deben ser perfectamente accesibles, de manera que el ángulo de proyección de 90° pueda ser conservado. Los revestimientos en fondos o en piezas complicadas que no permitan la expulsión de los gases provocan un torbellino de partículas proyectadas que trae consigo defectos en el revestimiento.

Preparación de la superficie a recubrir

Las superficies deben estar limpias y exentas de grasas. Las aristas y ángulos vivos deben ser eliminados o redondeados. Las superficies si es posible deben estar ligeramente precalentadas para evitar las condensaciones.

Mecanizado rugoso de la superficie cuando la superficie aún esté caliente. La rugosidad puede ser obtenida por chorreado o por amolado debiendo ser alrededor de 30 micras. En el caso de amolado utilizar una muela con aglutinante cerámico. Comprobar que la superficie del metal preparado de esta forma quede limpio.

Técnicas de revestimiento

El revestimiento de la pieza deberá realizarse inmediatamente después de la preparación de la superficie para poder mantener la temperatura de precalentamiento.

Proyectar una capa base de enganche de un espesor alrededor de 0,15 mm con XUPER ULTRABOND 51000.

Seguidamente el revestimiento anti desgaste de superficie con METACERAM 28030.

Características específicas

Microdureza de las partículas de polvo:	1.600 HV _{10g}
Punto de fusión:	1.950° C
Densidad del producto:	4,0 g/cm ³
Color del producto:	Blanco
Color del depósito:	Gris oscuro
Norma:	DIN 32529: K 5-4
Temperatura de servicio máxima:	1.000 °C

Mecanizado final

Muelas cerámicas (especificaciones)

Descripción: 11 C 80 F 13 V Pmf C 80 2 H 8 AV 18

Dimensiones: 400 mm diam. 25-40 mm long.

Parámetros de mecanizado:

Velocidad periférica de la muela:	30 m/seg
Velocidad periférica de la pieza:	20-23 m/min.
Velocidad de avance:	0,4-0,5 m/min
Profundidad por pasada:	0,012-0,02 mm
Refrigerante:	Emulsión
Rugosidad	1,0-2,0 micras

4.3. ALEACIÓN BASE NÍQUEL (ALUMINIO)



Descripción.

Aleación micropulverizada para ser proyectada como capa de enganche sobre aceros, aceros inoxidable, fundiciones, aluminio, níquel, aleaciones de níquel bronce pero no con el cobre puro.

Características técnicas.

- Aleación base Ni con adición de Al, Si, Ti.
- Fuerza de enganche: 30-50 N/mm².

Peso de Envase.

Referencia	Peso de Envase
51000 1250	1,25 kg.

Preparación de Superficies.

Desengrase: Utilizar alcohol industrial.

Rugosidad superficial: En el caso de superficies que no sean de rotación, es completamente necesario realizar un granallado con corindón o granalla metálica angular, a una presión comprendida entre 3,5 y 4,0 bar y un tamaño medio de partícula abrasiva de 0,8 mm.

En el caso de superficies de rotación o bien realizar una preparación rugosa como se ha descrito anteriormente o un fileteado rugoso donde la profundidad del filete sea la mitad del paso (ej: paso, 0,7 mm. profundidad, 0,35 mm.). Proteger las zonas a no proyectar aplicando la pasta refractaria R-104.

Parámetros de Proyección.

Precalentamiento: Hasta 100°C con llama potente con exceso de acetileno.

Para las superficies de rotación establecer una velocidad de giro de entre 20 y 30 m/min.

Utilizar preferentemente el avance automático del carro: 5 a 10 mm. por vuelta

Preproyectar utilizando llama neutra, una única capa utilizando una distancia de proyección de 150 mm

Castolin Iberica

P.I. de Alcobendas c/ San Rafael, 6
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 900 300 - 902 197 206
Fax 916 626 501 - Pedidos 902 116 534
EC00307/06

4.4. NiCrBSi

DESCRIPTION:

Eutalloy 10009 is a multi-component nickel-base alloy powder used to produce hard, low friction overlay deposits for wear or corrosion control. Composition based on AMS 4775C and precise particle sizing ensures consistent deposition, fusing and hardness. It is a hot process powder designed to be applied and fused using the Eutalloy or Ultrajet Eutalloy thermal spray processes. For applications on surfaces of steels, stainless steels, cast irons and nickel-base alloy that are subject to abrasion, metal to metal wear or in some cases corrosion. Resists softening at elevated temperatures and will not scale even when subjected to "red heats". Exceptionally dense, smooth deposits permit very thin passes. Deposits are non-magnetic and non-sparking. For applications that require very heavy buildup Eutectic 10185 can be used as a cushion layer.

APPLICATIONS:

- Cams Screws • Ceramic die cutters • Camshafts
- Ball joints • Plug gauges • Molds Nozzles
- Mandrels Tool rests • Valve seats • Tappets

TECHNICAL DATA:

Powder Properties

Magnetic Properties: This alloy contains enough Chromium, Boron, and Silicon to make it non-magnetic (ie Primarily Austenitic Structure).

Hall Flow Rate: 15 seconds

Bulk Density: 4.3 g/cc

Approximate Melting Range: Solidus, 1750°F (954°C)

Liquidus, 1950°F (1066°C)

Powder Coverage: 50 inch² per pound, 1/16" thick

Coating Properties

Hardness: Rockwell C scale 59

Density: 7.6 g/cc

Approximate Thermal Expansion: 200-1000° F $7.4 \times 10^{-6}/F$

1000-1400° F $7.2 \times 10^{-6}/F$

1400-1800° F $8.0 \times 10^{-6}/F$

Electrical Conductivity: Should be similar to NiChrome (80/20) alloy

Maximum Service Temperature: 1000°F (538°C)

Wear Resistance (ASTM G-65 Schedule A volume loss): 20-35 mm³

FINISHING PROCEDURE:

Grinding Wheel Type: Green Silicon Carbide
Grit Size: 60 - 80
Grade: H (soft)
Structure: 5
Bond Type: Vitrified
Wheel Speed: Use Manufacturer's Recommendation
Work Speed: 50 -65 surface feet per minute
Traverse Speed: Roughing, 5-15" per minute Finishing, 3-8" per minute
In-Feed: Roughing, 0.001" per pass Finishing, 0.0005" per pass or less
Coolant: Flood coolant with rust inhibitors in 2-5% concentration

Notes: 1. Before grinding, all edges and ends of coating must be chamfer ground. 2. Frequently dress the grinding wheel face to reduce friction and heat.

HEALTH & SAFETY:

Observe normal spraying practices, respiratory protection and proper air flow pattern advised. For general spray practices, see AWS Publications AWS C2. 1-73, "Recommended Safe Practices for Thermal Spraying and AWS TSS-85, "Thermal Spraying, Practice, Theory and Application." Thermal spraying is a completely safe process when performed in accordance with proper safety measures. Become familiar with local safety regulations before starting spray operations. DO NOT operate your spraying equipment or use the spray material supplied, before you have thoroughly read the equipment instruction manual. Refer to the Eutectic web site for Material Safety Data Sheet (MSDS) information. DISREGARDING THESE INSTRUCTIONS MAY BE HAZARDOUS TO YOUR HEALTH

YOUR RESOURCE FOR PROTECTION, REPAIR AND JOINING SOLUTIONS



Eutectic Corporation
N94 W14355 Garwin Mace Drive
Menomonee Falls, WI 53051 USA
P 800-558-8524 • F 262-255-5542
www.eutectic.com

Eutectic Canada
428, rue Alme Vincent
Vaudreuil-Dorion, Quebec J7V 5V5
Phone: (800) 361-9439
Fax: (514) 695-8793
www.eutectic-na.com

Eutectic Mexico
KM 36.5 Autopista
Mexico-Querétaro
54730 Cautilán-Izcalli
Estado de Mexico, Mexico
Phone: 011 (52) 55-5872-1111
e-mail: eutectic@eutectic.com.mx

Statement of Liability: Due to variations inherent in specific applications, the technical information contained herein, including any information as to suggested product applications or results, is presented without representation or warranty, expressed or implied. Without limitation, there are no warranties of merchantability or of fitness for a particular purpose. Each process and application must be fully evaluated by the user in all respects, including suitability, compliance with applicable law and non-infringement of the rights of others, and Eutectic Corporation and its affiliates shall have no liability in respect thereof.
10009 03-07-13 © 2007, Eutectic Corporation, ® Reg. T.M., Printed in the U.S.A. Part of the Messer World

PRESUPUESTO

En la siguiente tabla se reflejan los costes asociados al proyecto en concepto de consumibles, licencias de software y horas de trabajo de los profesionales implicados.

Es necesario mencionar, que no se han imputado los costes correspondientes al uso de material de laboratorio del que ya disponía la universidad, como pueden ser el soplete de proyección térmica, la báscula de precisión, los gases necesarios para realizar el pulverizado, etc. Ya que, en todo caso, se podría considerar la amortización de los mismos, pero su elevada vida útil o cantidad disponible frente a las horas de uso o ínfimas cantidades empleadas hace que este coste sea despreciable.

Respecto a las horas de trabajo, se ha estimado su valor en función de los que costaría reproducir el estudio en las condiciones de mercado actuales, ya que, en realidad las tareas de técnico de laboratorio han sido llevadas a cabo por un doctor en ingeniería industrial y el trabajo relativo al ingeniero a cargo del proyecto ha sido realizado por el estudiante en prácticas autor de este documento. Así mismo, no se contabilizan los costes asociados a la supervisión del mismo por parte del tutor.

Por último, citar que los proveedores de los productos detallados en la siguiente tabla son: CASTOLÍN IBÉRICA, S.L.U., proveedor de las aleaciones proyectadas; GRAPHENGLASS SL, encargado del suministro de grafeno; WOW USA, Inc., proveedor de los sustratos; y The Mathworks S.L., distribuidor del software empleado.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	PRECIO UD	UNIDADES	TOTAL
METACREAM 28030	Aleación AlO3- TiO2	155,54 €/kg	0,1165 kg	18,12 €
EUTALLOY 10009 BoroTec	Aleación NiCrBSi	988,5 €/kg	0,1525 kg	150,75 €
RotoTec 51000	Aleación Ni-Al	399,88 €/kg	0,197 kg	78,78 €
EUTALLOY 10112	Aleación base cromo	436,65 €/kg	0,05 kg	21,83 €
GraphenGlass 8gr	Grafeno multilayer	119,07 €/g	0,72 g	85,73 €
WOW ceramic tiles	Azulejos sustrato	27,95 €/m2	0,317709	8,88 €
MATLAB	Software	800 €/año	1	800,00 €
Ingeniero		24 €/hora	300 horas	7.200,00 €
Técnico laboratorio		24 €/hora	28 horas	672,00 €
TOTAL			9.036,09 €	

